

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Akademik Ivo Senjanović

Nikola Vladimir

Zagreb, 2007.

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio potpuno samostalno, na temelju znanja stečenog na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom, te uz nadzor mentora akademika Ive Senjanovića.

Nikola Vladimir

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru akademiku Ivi Senjanoviću na savjetima tijekom izrade diplomskog rada i na nesebičnom prenošenju znanja tijekom studija.

Hvala djelatnicima klasifikacijskog društva Lloyd's Register na ustupanju programske podrške za potrebe ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima i bratu na podršci koju su mi pružali, kako tijekom studija, tako i inače u životu.

Hvala Lucija...

Nikola Vladimir

SADRŽAJ

SAŽETAK	VI
POPIS VAŽNIJIH OZNAKA.....	VII
POPIS KRATICA	IX
POPIS SLIKA.....	X
POPIS TABLICA.....	XIII
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O PROBLEMU ZAPLJUSKIVANJA	4
2.1. Gibanje fluida u djelomično ispunjenim tankovima.....	5
2.2. Hidrodinamička opterećenja uslijed zapljuskivanja	7
2.2.1. Ne–impulsni dinamički tlak	8
2.2.2. Impulsni dinamički tlak tipa I.....	8
2.2.3. Impulsni dinamički tlak tipa II	8
2.2.4. Otpor unutarnje strukture.....	9
2.2.5. Polja tlaka izazvana vrtlozima	9
2.2.6. Tipovi udara fluida	10
3. SUVREMENI PRISTUPI PROBLEMU ZAPLJUSKIVANJA.....	11
3.1. Određivanje opterećenja	11
3.1.1. Modelska ispitivanja u mjerilu	11
3.1.2. CFD analiza.....	12
3.2. Procjena strukturnog odziva.....	14
3.3. Hidroelastična interakcija fluida i strukture.....	15
4. PRAVILA KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA	17
4.1. Opis punjenja i prirodni periodi fluida u tankovima	19
4.1.1. Opis punjenja	19
4.1.2. Prirodni periodi fluida.....	20
4.2. Maksimalna njihanja kroz vijek korištenja broda	20
4.2.1. Prirodni period ljuljanja broda	21
4.2.2. Prirodni period posrtanja broda	21
4.2.3. Maksimalni kut ljuljanja kroz vijek korištenja broda	21
4.2.4. Maksimalni kut posrtanja kroz vijek korištenja broda.....	21
4.2.5. Maksimalne amplitude poniranja i zanošenja	22
4.2.6. Maksimalno vertikalno ubrzanje kroz vijek korištenja broda	22
4.3. Utjecaj pljuskača na tlakove uslijed zapljuskivanja.....	22
4.4. Kombinirano opterećenje uslijed zapljuskivanja	23
4.5. Pretpostavke za pojavu zapljuskivanja i kritične razine punjenja ..	24
4.5.1. Pretpostavke za pojavu zapljuskivanja.....	24
4.5.2. Definiranje kritičnih razina punjenja	25
4.6. Analiza pojedinih tankova u ovisnosti o uvjetima plovidbe.....	25
4.7. Odobravanje broda za neograničene razine punjenja	25
5. ZNAČAJKE MATERIJALA U ANALIZI UČINAKA ZAPLJUSKIVANJA	27
5.1. Izotropni materijali	27

5.2.	Ortotropni materijali	28
5.3.	Viskoelastični materijali	29
6.	TEHNIČKE ZNAČAJKE ANALIZIRANOG BRODA.....	30
7.	PRORAČUN ZAPLJUSKIVANJA – POSTUPAK LLOYD'S REGISTER–A ...	33
7.1.	Općenito o proračunu zapljuskivanja prema SDA postupku	33
7.1.1.	Prva razina proračuna	34
7.1.2.	Druga razina proračuna.....	35
7.1.3.	Treća razina proračuna	36
7.2.	Program „SDA Fluids“	37
7.3.	Matematički model gibanja fluida i njegovo rješenje.....	41
7.3.1.	Osnove dinamike fluida	41
7.3.2.	Rješenje matematičkog modela numeričkom metodom	44
7.4.	Određivanje potrebnih razina proračuna – prirodni periodi.....	49
7.5.	Definiranje mreže za numerički proračun (idealizirani tank).....	52
7.6.	Rezultati proračuna zapljuskivanja za središnji tank	54
7.6.1.	Zapljuskivanje uslijed ljuljanja broda.....	54
7.6.2.	Zapljuskivanje uslijed posrtanja broda.....	61
7.7.	Rezultati proračuna zapljuskivanja za pramčani tank	67
7.7.1.	Zapljuskivanje uslijed ljuljanja broda.....	67
7.7.2.	Zapljuskivanje uslijed posrtanja broda.....	69
7.8.	Osvrt na rezultate proračuna dobivene prema SDA postupku	70
8.	PROVJERA STRUKTURNE IZDRŽLJIVOSTI	74
8.1.	Teorijske osnove.....	74
8.2.	Provjera izdržljivosti pojedinih panela središnjeg tanka.....	76
8.2.1.	Provjera izdržljivosti panela boka	76
8.2.2.	Provjera izdržljivosti panela palube	78
8.3.	Kratak osvrt na rezultate proračuna.....	80
9.	ZAKLJUČAK.....	81
9.1.	Zaključna razmatranja diplomskog rada.....	81
9.2.	Smjernice za daljnja istraživanja	82
10.	LITERATURA.....	83
	PRILOZI	85
	PRILOG A – Opći plan analiziranog broda i presjek na glavnom rebru	
	PRILOG B – Ulazne i izlazne liste programa „SDA Tank Assessment“	
	PRILOG C – Ulazne liste programa „SDA Fluids“	
	PRILOG D – Primjer izlazne liste programa „SDA Fluids“	
	PRILOG E – Detaljan prikaz maksimalnog tlaka za različite razine punjenja	
	PRILOG F – Ulazne i izlazne liste programa „SDA Ultimate Strength“	

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu obrađeni su problemi zapljuskivanja u djelomično ispunjenim tankovima, pod djelovanjem vanjske uzbude, tj. zadanog njihanja broda na valovima.

U Uvodu rada ukazano je na važnost pomorstvenih svojstava broda i na neke povijesne podatke važne za razvoj teorije pomorstvenosti i brodogradnje uopće, te je dana definicija zapljuskivanja, i još nekoliko podataka koji predočavaju, kako ekonomsku važnost zapljuskivanja, tako i njegovu nelinearnu i slučajnu, a time i složenu prirodu.

U sljedećim poglavljima opisana je fizikalna suština zapljuskivanja s prikazom osnovnih načina gibanja tekućine i njima uzrokovanih dinamičkih opterećenja. Navedeni su, i kritički opisani, pristupi istraživanju i rješavanju problema zapljuskivanja, kakvi se njeguju u istraživačkim institutima i vodećim klasifikacijskim društvima, kao i pravila koja klasifikacijska društva propisuju za djelomično ispunjene tankove. Dan je osvrt na značajke materijala tanka, koje su važne za analizu učinaka zapljuskivanja.

Na posljétku, obrađen je postupak za analizu zapljuskivanja, razvijen u klasifikacijskom društvu Lloyd's Register, kao i numerička metoda proračuna zapljuskivanja temeljena na rješavanju Navier–Stokesovih jednadžbi, te je proveden proračun zapljuskivanja za središnji i pramčani tank tankera nove generacije STENA PARIS, izgrađenog u brodogradilištu BRODOSPLIT. Razmatrano je zapljuskivanje pri ljuljanju i posrtanju broda. Postupak procjene strukturne izdržljivosti opisan je i primijenjen na strukturne elemente središnjeg tanka u uvjetima zapljuskivanja, pri ljuljanju broda.

POPIS VAŽNIJIH OZNAKA

Oznaka	Značenje	Prva uporaba
a	vertikalno ubrzanje broda	(4.21)*
b	visina primarnih ukrepa dna	(4.11)
e_{ii}	volumenska deformacija	(5.6)
e_{ij}	kutna deformacija	(5.6)
f_{wf}	faktor koji uzima u obzir broj okvirnih rebara i broj poprečnih pljuskača	(4.3)
g	gravitacijsko ubrzanje	(4.3)
h	visina stupca fluida u uspravnom položaju	(7.1)
h_{fill}	visina punjenja mjerena od unutarnjeg dna tanka	(4.8)
h_{max}	maksimalna visina tanka	(4.8)
l_{slh}	efektivna duljina zapljuskivanja	(4.3)
l_{tk-h}	duljina teretnog tanka na vodnoj liniji	(4.3)
n	broj primarnih ukrepa dna	(4.11)
n_{wash-t}	broj poprečnih pljuskača u tanku	(4.3)
r	polumjer okretanja ljuljanja	(4.15)
t	vrijeme	8
p	tlak	(3.1)
p_{max}	maksimalni tlak	(4.26)
p_{rigid}	tlak uslijed sudara s krutom stjenkom	(3.1)
p_{HE}	tlak uslijed interakcije fluid struktura (hidroelastična komponenta)	(3.1)
u	horizontalna komponenta brzine	(7.25)
v	brzina broda u službi, vertikalna komponenta brzine	(4.22)
ARb	omjer najveće i najmanje širine tanka	(7.15)
A_0	amplituda harmonijskog gibanja	(7.7)
B	širina broda	(4.16)
C_B	blok koeficijent	(4.16)
D	divergencija ćelije	(7.73)
E	Youngov modul elastičnosti	(5.2)
E_{∞}	Modul elastičnosti nakon relaksacije	(5.10)
F	otpor unutarnje strukture, visina (razina) punjenja, sila	(2.1)
F_{crit}	kritična razina punjenja	(4.28)
F_r	efektivni omjer punjenja	(4.9)
F_x	komponenta sile u smjeru x	9
F_y	komponenta sile u smjeru y	9
F_C	faktor punjenja	(4.9)
\overline{GM}	poprečna metacentarska visina	(4.15)
H	dubina fluida, visina broda, visina tanka	10
K	modul prostornog popuštanja	(5.9)

* Brojevi u zagradama odnose se na jednadžbe, a brojevi bez zagrada na stranice.

L	duljina broda	(4.2)
L_S	efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka	(2.1)
L_{OA}	duljina broda preko svega	30
L_{PP}	duljina broda između okomica	30
P	dinamički tlak uslijed zapljuskivanja, ukupni tlak na pregradu s uključenim utjecajem pljuskača, ekvivalentna visina statičkog tlaka	8
P_D	dinamički tlak bez utjecaja pljuskače	(4.23)
P_S	statički tlak bez utjecaja pljuskače	(4.23)
P_T	ukupni proračunati tlak bez utjecaja pljuskače	(4.24)
S_n	prirodni period broda	(4.10)
S_{np}	prirodni period posrtanja broda	(4.16)
S_{nr}	prirodni period ljuljanja broda	(4.15)
T	gaz broda	(4.16)
T_n	prirodni period fluida	(4.10)
T_{simul}	vrijeme trajanja simulacije	(7.13)
T_B	gaz broda u balastu	30
U	komponenta brzine u smjeru x	10
V	komponenta brzine u smjeru y	57
Z_{max}	amplituda poniranja	(4.19)
Y_{max}	amplituda zanošenja	(4.20)
α_{wash-t}	koeficijent poprečnih pljuskača u tanku	(4.3)
δt	vremenski korak u simulaciji	(7.60)
δ_x	širina ćelije	44
δ_y	visina ćelije	44
ε_{ij}	komponenta tenzora deformacije	(5.1)
ϕ_{max}	maksimalni kut ljuljanja broda	(4.17)
φ	fazni pomak, omjer tlaka i gustoće fluida	(7.7)
η	faktor povezan s prirodnim periodom broda	(4.28)
κ	koeficijent utjecaja pljuskače	(4.25)
λ	omjer površine otvora pljuskače i ukupne površine pljuskače, Lameova konstanta	(4.25)
μ	Lameova konstanta, modul smicanja, dinamička viskoznost	(5.1)
ν	Poissonov koeficijent, kinematička viskoznost	(5.2)
θ_{max}	maksimalni kut posrtanja broda	(4.18)
ρ	gustoća fluida	(4.2)
σ_{ij}	komponenta tenzora naprezanja	(5.1)
τ	vrijeme relaksacije	(5.10)
Δt	vremenski interval	8
∇	istisnina broda, Hamiltonov operator (nabla)	(4.16)

POPIS KRATICA

ABS	A merican B ureau of S hipping
BEM	B oundary E lement M ethod
BV	B ureau V eritas
CFD	C omputational F luid D ynamics
CL	C enter L ine
DLF	D ynamic L oad F actor
DNV	Det Norske Veritas
FEM	F inite E lement M ethod
FPSO	F loating P roduction S torage and O ffloading
LHS	L eft- H and S ide of the Equation
LNG	L iquefied N atural G as
LPG	L iquefied P etroleum G as
LR	L loyd's R egister
MAC	M arker A nd C ell
PDE	P artial D ifferential E quations
SDA	S tructural D esign A ssessment
SI	S ysteme I nternational d' U nités
VCG	V ertical C enter of G ravity

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG) i pripadni tankovi	1
Slika 2.1. Stojni val	5
Slika 2.2. Progresivni val	6
Slika 2.3. Hidraulički skok	6
Slika 2.4. Kombinirani val	6
Slika 2.5. Gibanje fluida za nisko punjenje (BV)	7
Slika 2.6. Gibanje fluida za visoko punjenje – stojni i lomljeni val (BV)	7
Slika 2.7. Ne–impulsni dinamički tlak	8
Slika 2.8. Impulsni dinamički tlak tipa I	8
Slika 2.9. Impulsni dinamički tlak tipa II	8
Slika 2.10. Otpor unutarnje strukture	9
Slika 2.11. Opterećenja inducirana vrtlozima oko vitkih elemenata	9
Slika 2.12. Pumpni toranj u LNG tanku	10
Slika 2.13. Polje brzina na mjestu tornja	10
Slika 2.14. Strmi valni udar	10
Slika 2.15. Udar lomljenog vala	10
Slika 2.16. Udar fluida sa plinskom zonom	10
Slika 3.1. Aparatura za modelska ispitivanja zapljuskivanja (SINTEF)	11
Slika 3.2. Zapljuskivanje u pravokutnom tanku	11
Slika 3.3. CFD simulacija – visoko punjenje	13
Slika 3.4. CFD simulacija – nisko punjenje	13
Slika 3.5. Polje brzina u prizmatičnom i sfernom tanku	13
Slika 3.6. Deformacije za spregnuti (lijevo) i nespregnuti (desno) model	16
Slika 4.1. Korekcijski faktor za posrtanje (C_{pp})	23
Slika 4.2. Korekcijski faktor za ljuljanje (C_{pr})	24
Slika 4.3. Prirodni periodi za ljuljanje	26
Slika 4.4. Prirodni periodi za posrtanje	26
Slika 5.1. Struktura čeličnog tanka tankera za naftu	27
Slika 5.2. Prikaz strukture membranskih tankova za prijevoz ukapljenog plina	27
Slika 5.3. Shematski prikaz koordinatnog sustava šperploče	28
Slika 6.1. Brod STENA PARIS za vrijeme gradnje na navozu	31
Slika 6.2. Brod STENA PARIS uz opremnu obalu	31
Slika 6.3. Brod STENA PARIS u plovidbi	31
Slika 6.4. Teretni prostori broda STENA PARIS	32
Slika 7.1. Dijagram toka proračuna zapljuskivanja prema LR–u	34
Slika 7.2. Korekcijski faktori za proračun maksimalnog tlaka	36
Slika 7.3. Mreža konačnih razlika i fiktivne ćelije, varijable i njihovi smjerovi	37
Slika 7.4. Koordinatni sustav mreže	38
Slika 7.5. Primjer definiranja rubova	38
Slika 7.6. Primjer definiranja unutarnje strukture u tanku	39
Slika 7.7. Korekcijski faktor K_t za određivanje opterećenja u trapeznom tanku	40
Slika 7.8. Razine proračuna i prirodni periodi za središnji tank – ljuljanje	50
Slika 7.9. Razine proračuna i prirodni periodi za središnji tank – posrtanje	50
Slika 7.10. Razine proračuna i prirodni periodi za pramčani tank – ljuljanje	51
Slika 7.11. Razine proračuna i prirodni periodi za pramčani tank – posrtanje	51
Slika 7.12. Mreža za središnji tank – poprečna ravnina	52

Slika 7.13. Mreža za središnji i pramčani tank– uzdužna ravnina	53
Slika 7.14. Mreža za pramčani tank – poprečna ravnina	53
Slika 7.15. Kutni pomak broda – ljuljanje.....	54
Slika 7.16. Kutna brzina broda – ljuljanje	54
Slika 7.17. Kutno ubrzanje broda – ljuljanje	55
Slika 7.18. Period ljuljanja broda	55
Slika 7.19. Vertikalni pomak broda (poniranje)	55
Slika 7.20. Vertikalno ubrzanje broda (poniranje).....	55
Slika 7.21. Period vertikalnog gibanja broda (poniranje)	55
Slika 7.22. Horizontalni pomak broda (zanošenje)	55
Slika 7.23. Horizontalno ubrzanje broda (zanošenje)	55
Slika 7.24. Period horizontalnog gibanja broda (zanošenje)	55
Slika 7.25. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 1	56
Slika 7.26. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 15	56
Slika 7.27. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 30	56
Slika 7.28. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed ljuljanja u $t=149,75$ s	57
Slika 7.29. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed ljuljanja u $t=149,75$ s	57
Slika 7.30. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed ljuljanja u $t=149,75$ s	57
Slika 7.31. Vektori brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja u $t=149,75$ s	58
Slika 7.32. Tlak [N/m ²] u središnjem tanku uslijed ljuljanja u $t=149,75$ s	58
Slika 7.33. Ovojnica u brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja	58
Slika 7.34. Ovojnica v brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja	59
Slika 7.35. Ovojnica ukupnih brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja	59
Slika 7.36. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 30%.....	59
Slika 7.37. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 45%.....	59
Slika 7.38. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 60%.....	60
Slika 7.39. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 75%.....	60
Slika 7.40. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 90%.....	60
Slika 7.41. Vremenska promjena tlaka – ćelija 51	60
Slika 7.42. Vremenska promjena tlaka – ćelija 52	60
Slika 7.43. Vremenska promjena tlaka – ćelija 77	60
Slika 7.44. Vremenska promjena tlaka – ćelija 78	60
Slika 7.45. Vremenska promjena tlaka – ćelija 79	61
Slika 7.46. Vremenska promjena tlaka – ćelija 80	61
Slika 7.47. Kutni pomak broda – posrtanje	62
Slika 7.48. Kutna brzina broda – posrtanje	62
Slika 7.49. Kutno ubrzanje broda – posrtanje	62
Slika 7.50. Period posrtanja broda	62
Slika 7.51. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)	62
Slika 7.52. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)	63
Slika 7.53. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)	63
Slika 7.54. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)	63
Slika 7.55. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje).....	64
Slika 7.56. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz).....	64
Slika 7.57. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji) .	64
Slika 7.58. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)	65
Slika 7.59. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)....	65
Slika 7.60. Tlak [N/m ²] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)	65
Slika 7.61. Tlak [N/m ²] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje).....	66

Slika 7.62. Tlak [N/m^2] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz).....	66
Slika 7.63. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 45%.....	66
Slika 7.64. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 60%.....	66
Slika 7.65. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 75%.....	67
Slika 7.66. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 90%.....	67
Slika 7.67. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 30%.....	68
Slika 7.68. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 45%.....	68
Slika 7.69. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 60%.....	68
Slika 7.70. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 75%.....	68
Slika 7.71. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 90%.....	68
Slika 7.72. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 45%	69
Slika 7.73. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 60%	69
Slika 7.74. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 75%	70
Slika 7.75. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 90%	70
Slika 7.76. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja pri ljuljanju broda	71
Slika 7.77. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja pri posrtanju broda.....	71
Slika 7.78. Vremenski prikaz sheme prosječnog pulziranja tlaka	72
Slika 7.79. Faktor dinamičkog opterećenja za trokutasto impulsno opterećenje	73
Slika 8.1. Geometrija panela	75
Slika 8.2. Ovojnica tlaka za ćelije na boku – punjenje 75%.....	76
Slika 8.3. Ovojnica tlaka za ćelije na boku – punjenje 90%.....	76
Slika 8.4. Usporedba tlakova od zapljuskivanja boka s kritičnim tlakom	77
Slika 8.5. Ovojnica tlaka za ćelije na pokrovu tanka – punjenje 75%	78
Slika 8.6. Ovojnica tlaka za ćelije na pokrovu tanka – punjenje 90%	78
Slika 8.7. Usporedba tlakova od zapljuskivanja palube s kritičnim tlakom	79

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tankovi koje treba analizirati ovisno o uvjetima plovidbe.....	25
Tablica 6.1. Glavne dimenzije broda	30
Tablica 6.2. Značajke tankova potrebne za proračun zapljuskivanja.....	32
Tablica 7.1. Značajke mreža za numerički proračun	52
Tablica 7.2. Opterećenja za središnji tank uslijed ljućanja – punjenje od 15%	54
Tablica 7.3. Opterećenja za središnji tank uslijed posrtanja – punjenja 15% i 30% ..	61
Tablica 7.4. Opterećenja za pramčani tank uslijed ljućanja – punjenje od 15%	67
Tablica 7.5. Opterećenja za pramčani tank uslijed posrtanja – punjenja 15% i 30% ..	69
Tablica 7.6. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja.....	71
Tablica 8.1. Tlak uslijed zapljuskivanja na bok tanka	77
Tablica 8.2. Tlak uslijed zapljuskivanja na pokrov tanka	79

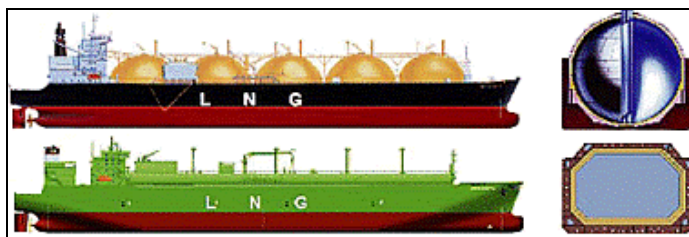
1. UVOD

Ponašanje broda na valovima je, zbog njegove složenosti, oduvijek bilo teško opisati jezikom matematike, odnosno fizike. Posao projektanta, koji bi trebao osigurati dobra pomorstvena svojstva broda i čvrstoću konstrukcije, zbog toga je prilično složen. Može se reći da brod ima dobra pomorstvena svojstva ukoliko posjeduje dovoljan stabilitet, amplitude oscilatornih gibanja su mu male, pri plovidbi na valovima more se ne prelijeva preko palube, njime se dobro kormilari, brodski vijak ne izranja, a brzina na uzburkanom moru znatnije se ne smanjuje.

Prvi pokušaji opisivanja ponašanja brodske konstrukcije na valovitom moru mogu se nazrijeti već polovinom 18. stoljeća u radovima velikih znanstvenika kao što su Leonard Euler, Pierre Bouguer i Daniel Bernoulli. Dok su Euler i Bouguer uglavnom razmatrali teoriju ponašanja broda na mirnoj vodi, Daniel Bernoulli je postavio temelje opisu njihanja broda na harmonijskim valovima. Ipak, djelo Williama Froudea „*On the Rolling of Ships*“ iz 1861. može se smatrati istinskim početkom znanosti o njihanju broda na valovima, jer se u njemu u odnosu na prethodne radove pojavljuje ispravno tumačenje djelovanja valne sile u smjeru normale na slobodnu površinu. Iako je danas moguće, uz određene pretpostavke, analizirati ponašanje broda na valovima pomoću prikladnih teorijskih i numeričkih postupaka, sažeti povijesni pregled razvoja teorije pomorstvenosti opisan u [1], te današnji stupanj ukupnog ljudskog znanja ukazuju na činjenicu da u preko dvjesto godina istraživanja ove problematike od strane mnogih fizičara, matematičara i inženjera nisu pronađena potpuno prihvatljiva rješenja za sve probleme spomenutog tipa koji se javljaju u suvremenoj brodogradnji.

Jedan od takvih problema koji predstavlja pravi izazov današnjim istraživačima je i zapljuskivanje u djelomično ispunjenim tankovima (engl. *sloshing*). Promatrajući iz brodograđevne perspektive, za opterećenja punih tankova može se reći da su na prihvatljiv način obrađena u pravilima klasifikacijskih društava, dok su problemi opterećenja djelomično ispunjenih tankova prilično daleko od točnog rješenja. U današnje vrijeme analiza zapljuskivanja je vrlo široki pojam i često se ne odnosi samo na gibanje fluida u tanku, već obuhvaća kompleksni skup različitih domena i tehnika koje zajedno služe ocjenjivanju prikladnosti strukture za podnošenje dinamičkih opterećenja uzrokovanih gibanjem fluida, uslijed vanjske uzbude (engl. *sloshing assessment*).

Gospodarska važnost brodova koji prevoze ukapljeni plin svakim danom je sve veća zbog širenja tzv. „LNG tržišta“. Genezu porasta potrebe za prijevozom LNG–a prvenstveno treba tražiti u ograničenosti raspoloživih izvora nafte, nominalno primarnog energenta, ali ne valja zapostaviti ni jačanje čovjekove ekološke svijesti koja svakako daje prednost prirodnom plinu kao ekološki prihvatljivom energentu.



Slika 1.1. Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG) i pripadni tankovi [2]

Također treba spomenuti da u svakom trenutku i potreba za energijom na globalnoj razini postaje sve veća, tako da se suvremenoj brodogradnji i pomorstvu,

kao karikama u prometnom lancu temeljenom na dislociranosti izvora energije i potrošača, nameće zadatak pronalaska novih koncepata u transportu prirodnog plina, manifestirajući se prije svega kroz potražnju za LNG brodovima sve većeg kapaciteta (premašena je do sada uobičajena granica u kapacitetu od 155 000 m³ teretnog prostora), koji trebaju imati izraženu fleksibilnost glede operabilnosti u stanju djelomične nakrcanosti.

Iako je problem zapljuskivanja najizraženiji kod LNG brodova i prethodno spomenuta potreba za takvim brodovima daje poticaj njegovu rješavanju, on se može, uz ispunjenje određenih uvjeta, javiti kod bilo kojeg broda, ali i bilo kojeg drugog prijevoznog sredstva ili objekta u čijim tankovima se nalazi tekućina (nužan uvjet pojave je postojanje slobodne površine). Ta činjenica ukazuje na neprijepornu potrebu za daljnjim izučavanjem fenomena zapljuskivanja i njegovih učinaka, u cilju zadovoljenja ponekad izrazito suprotstavljenih zahtjeva u vidu sigurnosti brodske konstrukcije u neizvjesnom okolišu s jedne, i minimalnih troškova njene gradnje i eksploatacije, s druge strane.

Gledajući pojednostavljeno, cijeli sustav analize zapljuskivanja i njegovih učinaka temelji se na procjeni gibanja broda na valovima, koje je u dinamičkoj interakciji s gibanjem tekućine u tanku (gibanje tekućine može biti više ili manje nasilno, s različitim tipovima udara i različitim profilima opterećenja), te na prenošenju opterećenja na strukturu koje se može izvršiti direktno ili ga je moguće promatrati u hidroelastičnoj interakciji. Važno je istaknuti da je zapljuskivanje eklatantan primjer izrazito nelinearnog i slučajnog rezonantnog fenomena, na koji utječu mnogi parametri, i može se pojaviti u različitim oblicima, ovisno o geometriji tanka, količini tekućine u tanku, dominantnom smjeru uzbude, amplitudi gibanja broda itd. Imajući u vidu na početku spomenute poteškoće u opisu gibanja broda na valovima i općenito poznatu činjenicu o poteškoćama u opisu strujanja fluida i za jednostavnije slučajeve (gibanje tekućine u ovom slučaju iznimno je složeno), te problematiku matematičkog modeliranja odziva impulsno opterećenih struktura, jasno je da se opis zapljuskivanja kao kombinacija svega toga zajedno, vrlo teško može poopćiti. Suvremeni pristup bavljenju ovom problematikom zahtijeva kombiniranje eksperimentalnih istraživanja i teorijskih promišljanja, te korištenje razmjerno opsežnog znanja (hidrodinamika, CFD, čvrstoća, materijali, eksperimentalne tehnike, instrumentacija u naravi itd.), kako bi se mogli najprije razviti, a zatim i riješiti prihvatljivi matematički modeli.

U okviru ovog rada dan je prikaz današnjeg stanja brodograđevne znanosti i prakse u istraživanju i predviđanju fenomena zapljuskivanja i njegovih popratnih učinaka. Opisani su osnovni načini gibanja fluida u djelomično ispunjenim brodskim tankovima, pod vanjskom uzбудom, kao i klasifikacija hidrodinamičkih opterećenja uzrokovanih takvim gibanjima. Razmotreni su suvremeni pristupi problemu zapljuskivanja, poput eksperimentalnih postupaka i numeričkih proračuna, s kritičkim osvrtom na njih. Određena pažnja posvećena je promatranju problema zapljuskivanja u hidroelastičnoj interakciji fluida i strukture. Nadalje, prikazana su stajališta, dosezi i pravila nekih od vodećih klasifikacijskih društava po pitanju pristupa verifikaciji djelomično ispunjenih tankova. Napravljen je poseban osvrt na materijale od kojih se sastoji struktura tankova, imajući na umu važnost njihovih značajki u analizi strukturnog odziva, gdje su dane osnovne veze između naprezanja i deformacije za pojedinu vrstu materijala. Opisan je postupak za proračun zapljuskivanja, razvijen u klasifikacijskom društvu Lloyd's Register, koji se sastoji od tri razine proračuna, kao i program „ShipRight“, odnosno njegovi programski moduli, koji su korišteni za provedbu proračuna. Posebna pažnja posvećena je trećoj proračunskoj razini koja uključuje analizu zapljuskivanja numeričkim postupkom. Objašnjen je matematički model gibanja tekućine temeljen na integralnoj formi

zakona očuvanja i primjeni drugog Newtonova zakona koji rezultira najprije Eulerovim, a posljedično i Navier–Stokesovim jednadžbama, te je prikazana formulacija jednadžbi gibanja u obliku prilagođenom za rješavanje na računalu. Analiza je provedena za središnji i pramčani tank tankera za prijevoz nafte STENA PARIS tipa STENA P–MAX, izgrađenog u brodogradilištu BRODOSPLIT, za ljuljanje i posrtanje. Potrebna proračunska razina utvrđena je programom „SDA Tank Assessment“, na temelju proračuna prirodnih perioda osciliranja tekućine u poprečnoj i uzdužnoj ravnini pri odabranim razinama punjenja, te proračuna prirodnih perioda ljuljanja i posrtanja broda za brod u balastu i potpuno nakrcani brod. Za razine punjenja pri kojima je utvrđena potreba za numeričkim proračunom spomenuti matematički model rješavan je programom „SDA Fluids“ pomoću dvodimenzionalne proračunske sheme konačnih razlika. Rezultati proračuna, u vidu rasporeda brzina i tlakova u fluidu u određenim trenucima, kao i ovojnice tlaka su prikazani uglavnom dijagramski, i to samo za slučajeve, koji su po nekom kriteriju karakteristični. Strukturna izdržljivost procijenjena je pomoću programa „SDA Ultimate Strength“. Za strukturne elemente za koje je ocijenjeno da neće izdržati opterećenja uzrokovana zapljuskivanjem, predloženo je povećanje dimenzija.

2. OPĆENITO O PROBLEMU ZAPLJUSKIVANJA

Složenost pojave zapljuskivanja koja proizlazi iz mnoštva parametara koji ju determiniraju i čiji utjecaj je u nekim slučajevima razmjerno nejasan a time ponekad i potpuno nedostupan matematičkom modeliranju, a kamoli rješavanju eventualnog modela, direktno ukazuje na nepostojanje jedinstvenog pristupa u njenom istraživanju. Otvara se pitanje treba li uopće težiti pronalasku univerzalnog modela jer bi njegova rješivost u realnom i s inženjerskog stajališta prihvatljivom vremenu, s obzirom na ranije opisane poteškoće u tumačenju fizičke suštine zapljuskivanja, bila barem upitna, a najvjerojatnije i nemoguća.

Ipak klasifikacijska društva kao i istraživački instituti već godinama ulažu mnoge napore u istraživanju zapljuskivanja i njegovih učinaka, kombinirajući pritom već spomenuta teorijska promišljanja i njima pripadnu numeričku podršku s modelskim ispitivanjima u mjerilu, ali i praćenje brodova u službi kako bi na temelju povratnih informacija upotvornili vlastite spoznaje.

Analiza gibanja tekućine u tanku provodi se kako bi se odredila opterećenja uslijed zapljuskivanja kao i njihova distribucija na strukturnim elementima tanka, odnosno kako bi se provjerilo ponašanje strukture pod takvim opterećenjima. U spomenutoj analizi potrebno je krenuti od predviđanja gibanja broda na valovima, što je moguće učiniti koristeći neki od mnoštva razvijenih hidrodinamičkih programskih alata ili pomoću ispitivanja na modelima u bazenu. Važno je reći da se kod zapljuskivanja kao rezonantnog fenomena najnepovoljnija stanja ne moraju pojaviti za maksimalne odzive broda [3]. To ukazuje da se vanjska valna opterećenja u većini slučajeva praktično mogu opisivati linearnim teorijama. Svejedno, nelinearnosti se moraju uzeti u obzir kod razmatranja gibanja tekućine. Općenito, ponašanje tekućine razmatra se eksperimentalno u prikladnim laboratorijima, te korištenjem pogodnih CFD ili nekih drugih programskih alata.

Postoji mnoštvo oblika tankova (pravokutni, prizmatični, sferni, konični, horizontalni cilindrični i sl.) kao i mnoštvo vrsta tekućina koje se u tim tankovima prevoze (nafta, ukapljeni plin, voda i sl.) kod kojih se može pojaviti zapljuskivanje, ali potrebno je istaknuti da je načelno njegov utjecaj manji što je više strukture u tanku koja ometa slobodni tok fluida. U tanku koji je gladak, i bez spomenute unutarnje strukture, viskozno prigušenje fluida je vrlo maleno (valja napomenuti da se, općenito, prigušenje povećava sa smanjenjem visine punjenja), pa je potrebno razmjerno dugo vrijeme dok se fluid smiri. Oblik tanka, razina punjenja i značajke gibanja tanka (primjerice amplituda ili frekvencija), čine osnovne parametre koji određuju prirodu gibanja slobodne površine.

Iako je novi tip prizmatičnog LNG tanka dao veliki poticaj razmatranju zapljuskivanja, još bi se moglo naći mnoštvo primjera u brodogradnji (pomorstvu) gdje je fenomen zapljuskivanja prisutan, poput FPSO brodova [4] ili brodova za prijevoz rasutog tereta koji imaju balastne tankove čiji se sadržaj mora izmjenjivati izvan luke.

Zapljuskivanje je uvijek smatrano važnim projektnim kriterijem u tankerima za prijevoz nafte, bez obzira što su kod njih razmjerno rijetka stanja djelomičnog punjenja. Nakon što su u brodograđevnu praksu uvedeni tankeri s dvostrukom oplatom, brodovlasnici redovito nastoje izbjeći unutarnju strukturu tankova zbog čišćenja, pa je ponekad potrebno, imajući u vidu glatkoću i širinu tanka, napraviti procjenu ponašanja strukture u slučaju pojave zapljuskivanja.

Kada se razmatra problem zapljuskivanja, nije dovoljno povesti računa samo o opterećenjima koja se javljaju lokalno u strukturnim elementima, ili uzimati u obzir opterećenja cijele strukture tanka, već treba promatrati kako se spomenuti efekti

reflektiraju na ponašanje broda na valovima [5]. Često se ovi efekti koriste kod brodova koji imaju ugrađene tankove za ublažavanje ljuljanja. Naime, prema [3] moment ljuljanja induciran zapljuskivanjem može prigušivati ljuljanje, ukoliko se u odnosu na prirodni period ljuljanja broda pravilno izabere prirodni period gibanja fluida u tankovima.

2.1. Gibanje fluida u djelomično ispunjenim tankovima

Uslijed gibanja broda na valovima, koje kao uzbuda djeluje na sadržaj tankova tereta, u tankovima će se stvarati valovi. Valovi su direktno ovisni o razini punjenja i frekvenciji oscilacija, odnosno uvjetima uzbude, pa se može reći da je broj načina gibanja fluida koji mogu nastupiti beskonačan. Ipak iz mnoštva spomenutih načina, moguće je izdvojiti neke tipične, ali i takvo izdvajanje, na neki način, prepušteno je subjektivnoj interpretaciji.

Valovi koji se pojavljuju u tankovima mogu biti [6], [7]:

- stojni val,
- progresivni val,
- hidraulički skok,
- kombinirani val.

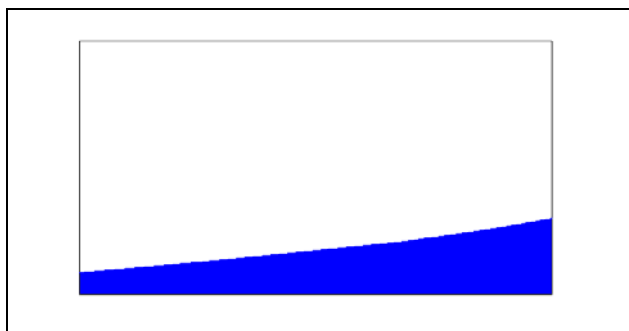
Kod **stojnog vala** pomaci čestica tekućine na površini u osnovi su vertikalni. Na površini se javlja jedan ili više čvorova gdje praktički ne postoji vertikalno gibanje tekućine. Općenito se kao granica pojavljivanja stojnih valova prema LR-u [6] može uzeti sljedeći izraz:

$$\frac{F}{L_s} \geq 0,2 \quad (2.1)$$

pri čemu je:

F – razina punjenja [m],

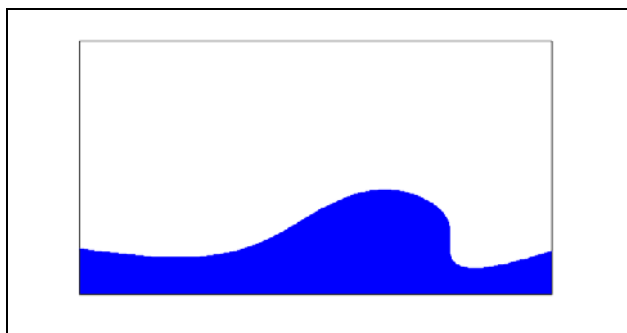
L_s – efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka [m].



Slika 2.1. Stojni val

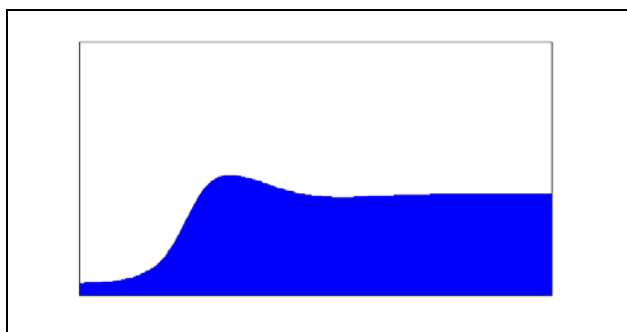
Površina kod **progresivnog vala** je bez čvorova. Valni brijegovi takvih valova putuju naprijed–natrag između vertikalnih stjenki tanka. Progresivni valovi izazivaju velike tlakove od sudara na bočnoj oplati i na pokrovu tanka. Prema istraživanjima LR-a progresivni valovi se pojavljuju ako vrijedi:

$$\frac{F}{L_s} < 0,2 \quad (2.2)$$



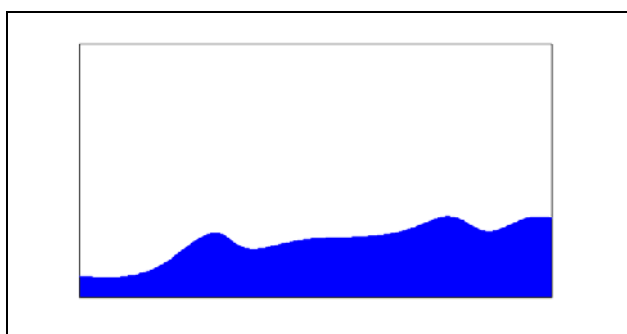
Slika 2.2. Progresivni val

Hidraulički skok se može promatrati kao poseban slučaj progresivnog vala. Karakterizira ga diskontinuitet (skok) na površini koji formira vertikalnu frontu koja se periodično pomiče naprijed–natrag u tanku. Hidraulički skokovi u općem slučaju nastaju samo ukoliko je razina punjenja manja ili jednaka 20% horizontalne duljine slobodne površine u tanku.



Slika 2.3. Hidraulički skok

Kombinirani val predstavlja kombinaciju stojnih i progresivnih valova. Pri niskoj razini punjenja stojni val će se pojavljivati kada tank oscilira frekvencijom mnogo nižom od prirodne frekvencije fluida. Kako se povećava frekvencija uzbude, stojni val se transformira u niz progresivnih valova vrlo male valne duljine. U rasponu frekvencija koje su bliske rezonantnoj frekvenciji fluida formira se hidraulički skok i pri vrlo malom poremećaju. Ukoliko se frekvencija i dalje povećava iznad rezonantne, hidraulički skok će prijeći u jedinstveni val.



Slika 2.4. Kombinirani val

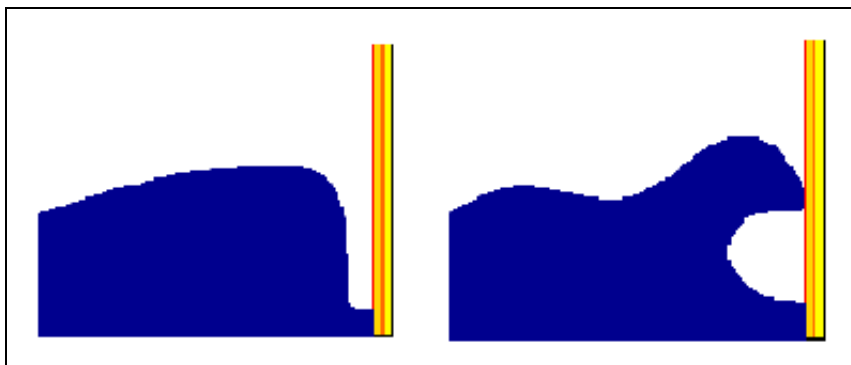
Kod visokih razina punjenja u rezonantnom području zapljuskivanje je karakterizirano formiranjem stojnih valova velike amplitude. Takvi valovi su asimetrični i mogu biti kombinirani s progresivnim valovima kod velikih amplituda uzbude.

Prema istraživanjima BV-a [8] gruba podjela gibanja fluida tijekom zapljuskivanja može se napraviti na temelju promatranja dvodimenzijskog gibanja

fluida u tanku, uzbuđenom harmonijskom uzbuđom s jednim stupnjem slobode, preko pokusa u smanjenom mjerilu ili preko CFD simulacija.

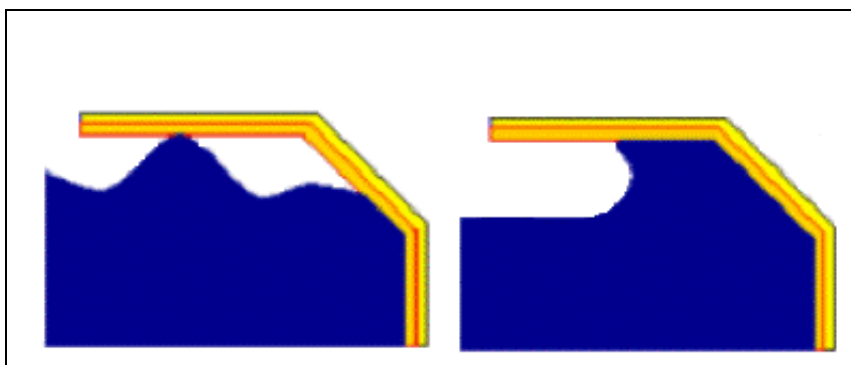
U slučaju umjerene uzbude slobodna površina pomiče se ravno, dok se pri povećanju brzine uzbude pojavljuju dva različita toka fluida, ovisno o punjenju i gabaritima tanka.

U slučaju niskog punjenja mogu se javiti hidraulički nabori koji putuju u vidu progresivnog vala naprijed–natrag između stjenki tanka, te je moguće da se u slučaju njihova lomljenja prema naprijed pojavi tzv. „plinska klopka“.



Slika 2.5. Gibanje fluida za nisko punjenje (BV) [8]

Prema zapažanju BV–a ukoliko je omjer dubine fluida i duljine slobodne površine veći od 0,30 javlja se stojni val čiji je broj čvorova ovisan o periodu uzbude.



Slika 2.6. Gibanje fluida za visoko punjenje – stojni i lomljeni val (BV) [8]

Spomenuta nomenklatura tipova gibanja prilikom zapljuskivanja ne mora se smatrati potpuno općenitom, jer se ovisno o obliku tanka mogu javiti i još neki tipovi gibanja. Osobito je zanimljivo gibanje tekućine u sfernom tanku koji na sredini ima vitki element u polju oscilirajućeg fluida [9].

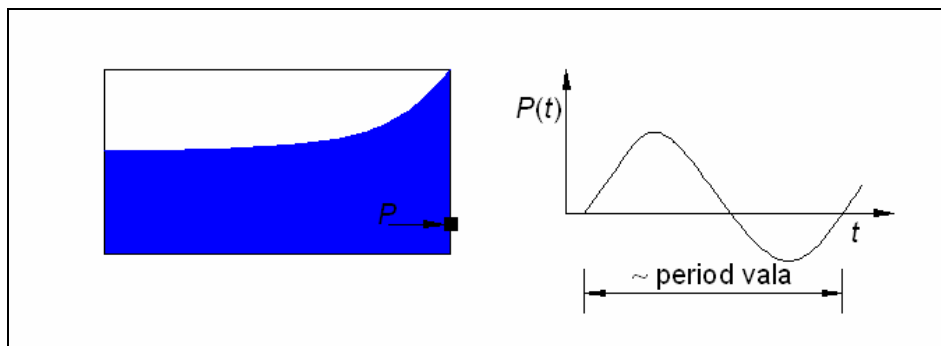
2.2. Hidrodinamička opterećenja uslijed zapljuskivanja

Već je ranije navedeno da zapljuskivanje uzrokuje različite tipove hidrodinamičkog opterećenja na tank i strukturu koja ga podupire. Postoje dva tipa hidrodinamičkog tlaka koja mogu nastati uslijed zapljuskivanja:

- ne–impulsni tlak,
- impulsni tlak (postoje dva tipa).

2.2.1. Ne-impulsni dinamički tlak

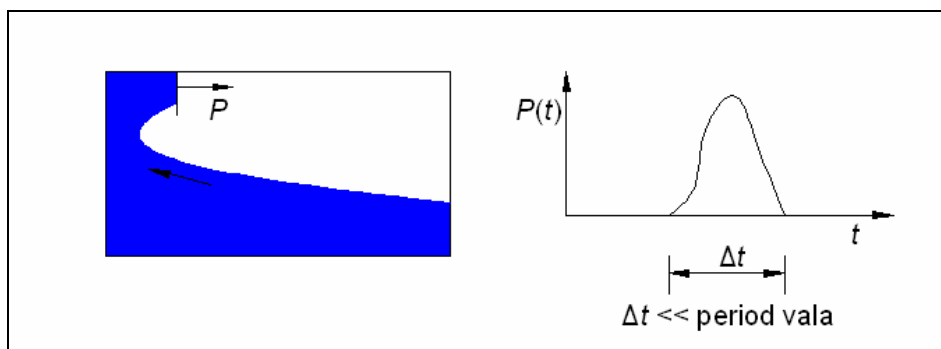
Ne-impulsni dinamički tlak odnosi se na opterećenja koja se polagano mijenjaju, pulsirajući s periodom koji je otprilike jednak periodu vala u tanku koji je to opterećenje izazvao (prirodni period tekućine). Ovaj tip opterećenja često se može promatrati kvazi-statički.



Slika 2.7. Ne-impulsni dinamički tlak

2.2.2. Impulsni dinamički tlak tipa I

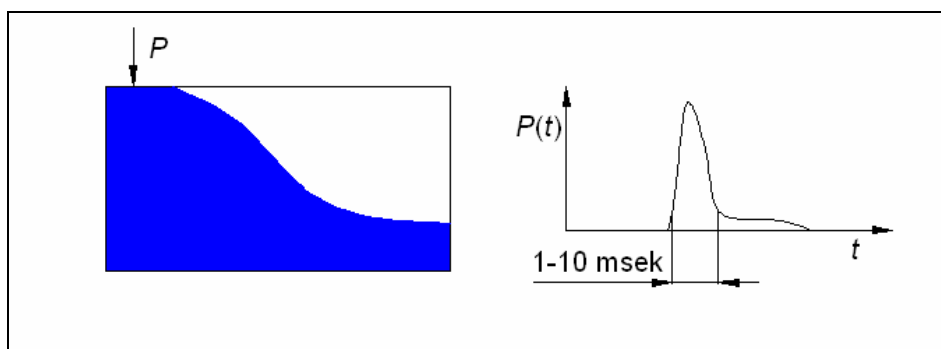
Impulsni dinamički tlak tipa I nastaje uslijed naglog, ali kontinuiranog nagomilavanja tekućine i povećanja tlaka na površini elementa koji postupno zaranja. Tipično trajanje impulsa je otprilike desetinu perioda uzbude.



Slika 2.8. Impulsni dinamički tlak tipa I

2.2.3. Impulsni dinamički tlak tipa II

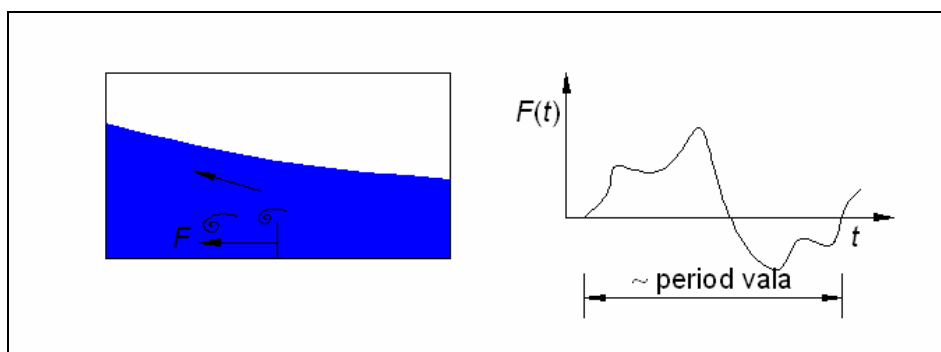
Impulsni dinamički tlak tipa II nastaje lokalno uslijed kolizije fluida i čvrste površine. Takvi tlakovi mogu biti izuzetno veliki, a vrlo su kratkog vremena trajanja.



Slika 2.9. Impulsni dinamički tlak tipa II

2.2.4. Otpor unutarnje strukture

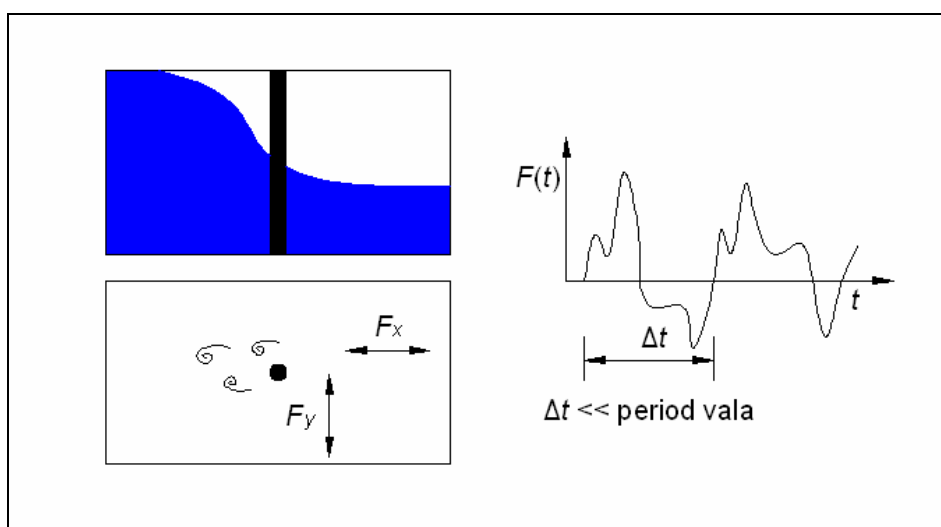
Ovakve sile imaju ne-impulsna obilježja i djeluju na unutarnju strukturu s vremenom fluktuacije koje otprilike odgovara periodu vala zapljuskivanja.



Slika 2.10. Otpor unutarnje strukture

2.2.5. Polja tlaka izazvana vrtlozima

Kada se govori o opterećenjima u tankovima potrebno je navesti i polja tlaka izazvana vrtlozima. Takva polja tlaka stvaraju se oko vitkih elemenata smještenih u polju oscilirajućeg fluida.



Slika 2.11. Opterećenja inducirana vrtlozima oko vitkih elemenata

Treba obratiti pozornost na fluktuacije tlaka generirane gibanjem tekućine, vodeći računa o prirodnim frekvencijama vibriranja vitkih elemenata, kako bi se izbjegli rezonantni učinci. Vrijeme fluktuacije tlakova izazvanih vrtlozima dosta je manje od perioda vala.

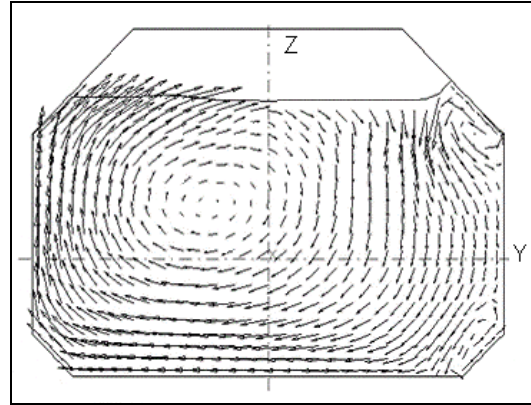
Iako nije direktno povezano s fizikalnim osnovama problema zapljuskivanja, korisno je ovdje spomenuti da provjera ponašanja vitke strukture prikazane na sljedećoj slici (Slika 2.12.) prilikom zapljuskivanja, provedena od strane klasifikacijskog društva Bureau Veritas, vjerodostojno predočava složenost razmatrane problematike. Opterećenja koja su uzeta u obzir su sljedeća [8]:

- hidrodinamička opterećenja dobivena simulacijama zapljuskivanja,
- inercijske sile vezane za gibanje broda, određene hidrodinamičkim proračunom,

- termička opterećenja povezana s gradijentom temperaturnog polja u uvjetima djelomičnog punjenja,
- vlastita masa strukturnih elemenata uključujući i pridodanu masu tekućine,
- uzgon uronjenih strukturnih elemenata,
- momenti čiji je uzrok rad pumpi.



Slika 2.12. Pumpni toranj u LNG tanku [8]

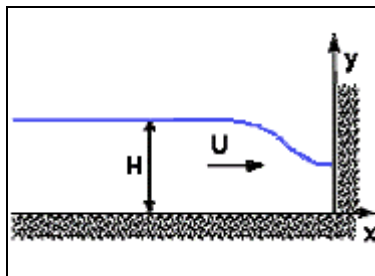


Slika 2.13. Polje brzina na mjestu tornja [8]

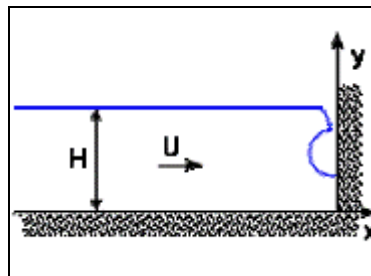
2.2.6. Tipovi udara fluida

Prema brojnim modelskim istraživanjima iz prakse klasifikacijskog društva Bureau Veritas udari uslijed zapljuskivanja mogu se svrstati u tri osnovne grupe:

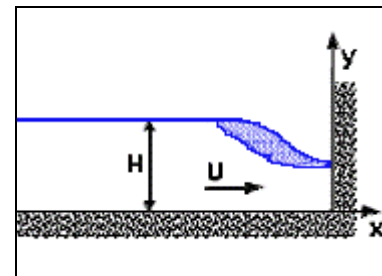
- strmi valni udar,
- udar lomljenog vala,
- udar fluida sa plinskom zonom.



Slika 2.14. Strmi valni udar



Slika 2.15. Udar lomljenog vala



Slika 2.16. Udar fluida sa plinskom zonom

Napomena:

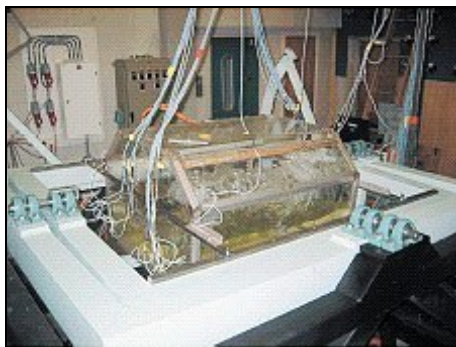
Gornje slike preuzete su iz [10].

3. SUVREMENI PRISTUPI PROBLEMU ZAPLJUSKIVANJA

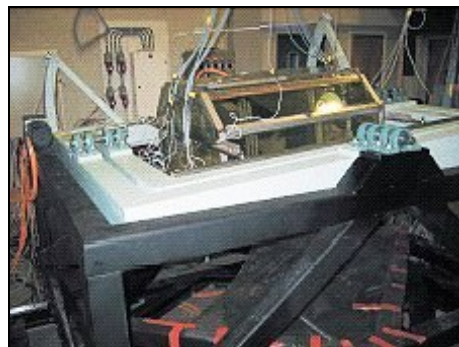
3.1. Određivanje opterećenja

3.1.1. Modelska ispitivanja u mjerilu

Ekstrapolacija rezultata koji bi se dobili mjerenjem tlakova uslijed udara fluida u tankovima, koji su izrađeni u smanjenom mjerilu u odnosu na referentni tank, prilično je delikatna. Ona je ovisna o mnoštvu fizikalnih parametara fluida i stijenke, sudionika u dinamičkoj interakciji, kao što su primjerice: gustoća, viskoznost, napetost površine, stlačivost fluida itd.



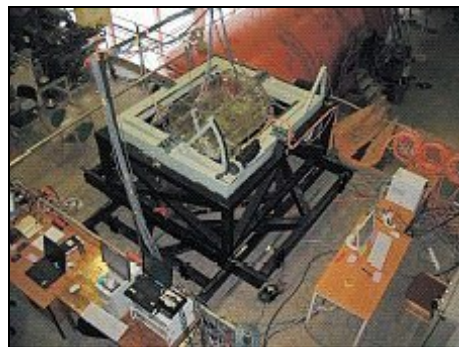
a)



b)

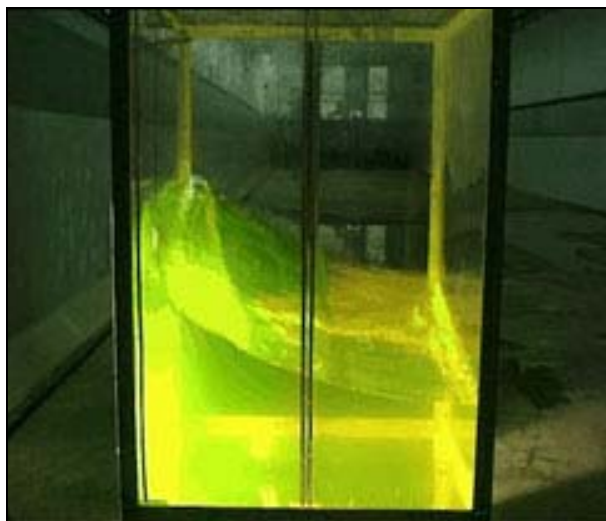


c)



d)

Slika 3.1. Aparatura za modelska ispitivanja zapljuskivanja (SINTEF) [11]



Slika 3.2. Zapluskivanje u pravokutnom tanku [11]

Današnja praksa pri provođenju eksperimentalnih istraživanja u ovoj domeni obično je zadovoljavanje sličnosti prema Froudeu. Takav način daje prihvatljive rezultate kada je riječ o predviđanju valnih opterećenja brodova i pučinskih objekata koji su izloženi dinamičkom opterećenju čije je trajanje razmjeno dugo i čija maksimalna vrijednost nije pretjerano velika (viskoznost, stlačivost i napetost površine u ovom slučaju nemaju dominantan utjecaj). Ovakav pristup, koji je dovoljno dobar kada se radi primjerice o interakciji vode i čelične stjenke, za ukapljeni plin ne bi bio pogodan, imajući u vidu i znatno složeniju strukturu tanka (elastične membrane sa raznim vrstama izolacije, Slika 5.2.), ali i kompleksne fenomene na slobodnoj površini (lomljenje valova i fazne pretvorbe između tekućeg i plinovitog agregatnog stanja). Sličnost prema Froudeu pogodno je zadovoljavati ukoliko se želi dobiti uvid u prosječna globalna opterećenja uslijed zapljuskivanja, dok s interpretacijom lokalnog tlaka prouzrokovanog udarom treba biti izuzetno oprezan.

Pri provođenju ispitivanja geometrija tanka iznutra se mora što vjerodostojnije modelirati. Ako je površina referentnog tanka korugirana (primjerice Mark III sistem kod tankova za ukapljeni plin), korugacija se može zanemariti. Model tanka i podupirući sustav moraju biti dovoljno robusni da se anuliraju strukturne vibracije i gibanja tanka uzrokovana zapljuskivanjem. Preporučljivo je da generator gibanja može generirati gibanje u svih 6 stupnjeva slobode, jer je u protivnom često potrebno eksperimentalno dokazivati da zanemarivanje pojedinih stupnjeva slobode nema bitan utjecaj na tlakove od zapljuskivanja. Senzori tlaka moraju se smjestiti u područja gdje se javljaju kritični udari. Tipična područja javljanja kritičnih udara za visoka punjenja su kutovi i krajevi na vrhu tanka, a za niska punjenja stjenke tanka u blizini slobodne površine i malo iznad slobodne površine. Trajanje modelskih testova mora biti dovoljno dugo da se izmjeri dovoljan broj udarnih tlakova za statističku analizu (često je potrebno trajanje mjerenja više od 5 sati za svaki oblik gibanja tanka). Kada se odrede kritični slučajevi po pitanju razina punjenja i dominantnih smjerova uzbude za te razine, često je potrebno takve testove ponavljati da se dobije što više uzoraka, kako bi statistička analiza bila što vjerodostojnija.

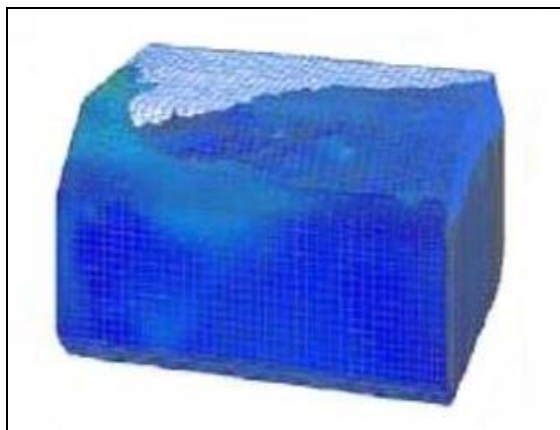
3.1.2. CFD analiza

U posljednje vrijeme vrlo je intenzivan rad na području primjene metoda proračunske dinamike fluida (CFD) u modeliranju ponašanja fluida za vrijeme zapljuskivanja. Inače, prednost rješavanja problema metodama CFD-a je mogućnost razmatranja vrlo kompleksnih modela pod djelovanjem općenite uzbude. Na tržištu postoji mnoštvo općenitih CFD programskih alata kojima je moguće osigurati vrlo dobru vizualizaciju toka fluida, uključujući i detalje kao što je primjerice distribucija vrtloženja, simulacija odvajanja strujanja i sl.

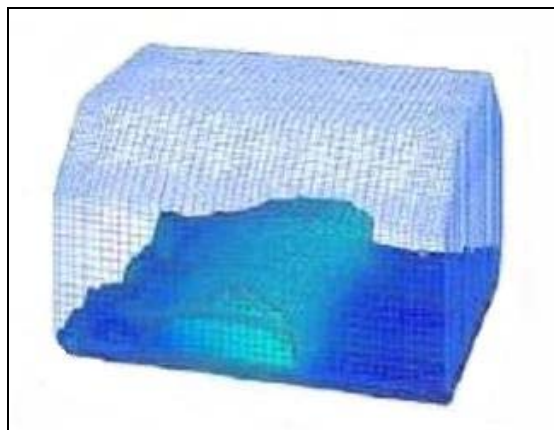
Jedan od nedostataka CFD-a je općenito poznata činjenica da CFD kodovi imaju poteškoće u proračunavanju udarnih opterećenja, osobito kada je kut između udarne slobodne površine i površine tijela vrlo mali. Nadalje, neke metode nisu uvijek dovoljno stabilne pa se često javlja tzv. pucanje proračuna (primjerice kada se opisuje obaranje vala na slobodnu površinu metodom rubnih elemenata – BEM) [3].

Kada se govori o metodi rubnih elemenata, treba spomenuti i numeričke probleme koji se vrlo često javljaju na presjecištu slobodne površine i rubova tijela. Inače, proračuni koji se izvršavaju metodom rubnih elemenata (ukoliko metoda radi za promatrani problem) vrlo su brzi i precizni u odnosu na proračune drugim metodama, i zanimljivo je da se njome mogu jako dobro opisati nelinearni efekti ulaska vode u dvodimenzionalna tijela (pretpostavlja se potencijalno strujanje).

CFD metode temeljene na rješavanju Navier–Stokesovih jednadžbi vrlo su raširene. Problem koji se kod takvih metoda često javlja je dobivanje rješenja koja nemaju fizikalni smisao. Naime, ako se ne pazi dovoljno, može se javiti numerička greška koja uzrokuje umjetno stvaranje ili nestajanje (promijeni se masa) fluida, pa je potrebna kontrola rezultata na temelju pokusa [3].



Slika 3.3. CFD simulacija – visoko punjenje [2]

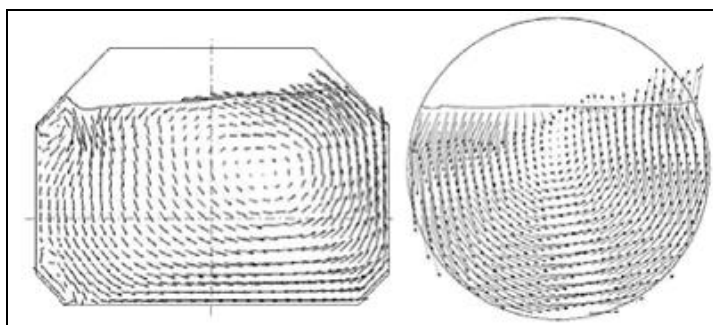


Slika 3.4. CFD simulacija – nisko punjenje [2]

Procjena tlakova uslijed udara ukapljenog plina numeričkom CFD analizom još uvijek je dosta nepouzdana i razmjerno skupa prvenstveno zato što CFD programski alati nisu pogodni za opise lokalnih pojava koje u ovom slučaju imaju dominantnu ulogu. Visoki udarni tlak je striktno lokaliziran u vremenu i prostoru, a ujedno je i dosta ovisan o lokalnim efektima kao što su: mali površinski val, hrapavost stjenke, lokalna deformacija stjenke i sl.

Maksimalna vrijednost udarnog tlaka povezana je s rasprostiranjem vala kroz fluid te s propagacijom valova naprezanja kroz strukturu. Tako kompleksni fenomeni (barem kada je riječ o dijelu koji se tiče fluida) morali bi se numerički simulirati rabeći izrazito ugrađenu mrežu. Izvođenje dugotrajnih simulacija zapljuskivanja općenitim CFD programskim alatima da bi se dobio adekvatan uzorak udara koji je slučajne naravi, kako bi se mogla izvršiti statistička analiza, nije uvijek pogodno za provedbu, jer je u nekim slučajevima (ovisno o značajkama fluida koje imaju dominantan utjecaj na promatranu simulaciju) izvođenje pokusa čak isplativije.

Ipak, CFD simulacije u analiziranju pojave zapljuskivanja i njenih učinaka imaju svoju primjenu jer mogu dati informacije koje se tiču same kinematike fluida. Određenim postupcima moguće je kvantificirati udar na temelju prikupljenih podataka o udarnoj brzini, koji se na prikladan način povežu s relativnim nagibom stjenke i strujanjem fluida prije udara.



Slika 3.5. Polje brzina u prizmatičnom i sfernom tanku [2]

Programski alati za CFD analizu nisu samo zahtjevni u tvorbenom smislu, jer i njihovo korištenje zahtjeva visoku razinu poznavanja fizikalne suštine problema.

Naime, korištenje takvih alata uvelike je slično pripremi pokusa. Ako pokus nije pripremljen tako da vjerodostojno dočarava situaciju koju želimo analizirati, nemoguće je dobiti točne i uporabljive rezultate, a analogija vrijedi i za provedbu numeričke analize [12]. Korisnik programskog alata mora (znati) odlučiti koji su čimbenici ključni za opis problema koji se želi analizirati i na koji način oni moraju biti uzeti u obzir. Pri provedbi analiza CFD programskim alatima uputno je voditi računa o sljedećim pitanjima:

- Što se želi zaključiti iz analize?
- Koje je mjerilo odabrano i kako treba biti odabrana mreža da se obuhvate važni fenomeni?
- Koji rubni uvjeti najbolje opisuju fizikalni problem?
- Koji fluid je potrebno odabrati?
- Koje značajke fluida su dominantne za razmatranu problematiku?
- Postoje li još neki fizikalni fenomeni koji su važni?
- Kakve početne uvjete treba odabrati?
- Koji sustav mjernih jedinica je najjednostavniji za korištenje?

3.2. Procjena strukturnog odziva

Sa stajališta strukturne izdržljivosti, evidentno je da su trenutno primjenjivane tehnike za procjenu najtežih uvjeta opterećenja koji se mogu javiti uslijed zapljuskivanja, razmjerno nepouzdanе, te kao što je već spomenuto ne postoji adekvatan općeniti numerički model koji bi opisao interakciju prilično složene strukture i tekućine prilikom zapljuskivanja na potpuno zadovoljavajući način. Pristup koji za procjenu strukturnog odziva koristi klasifikacijsko društvo Bureau Veritas (vjerojatno i većina ostalih institucija koje se bave razmatranom problematikom) temeljen je na sprezi između određenih numeričkih i eksperimentalnih postupaka. Nadalje, u tekstu su navedene neke činjenice koje se odnose na eksperimentalno ispitivanje ponašanja strukture.

Materijal od kojeg je izgrađena struktura (vidi poglavlje 5) i njegove mehaničke značajke imaju veliku važnost u procjeni izdržljivosti strukture koja je izložena dinamičkim opterećenjima razmatranog tipa, te su također bitni i pri provjeri numeričkih modela. Općenito, glavne značajke materijala dobivaju se od isporučitelja, no ponekad se mogu javiti određena odstupanja, pa je stoga potrebno izvršiti pokuse za provjeru elastičnosti i granične čvrstoće pod statičkim i dinamičkim opterećenjima u okolišnim i kriogenim uvjetima.

Specifična izdržljivost pojedinih panela također se treba provjeriti kako bi se identificirali načini oštećenja, ali i u cilju predviđanja graničnih stanja pojedinih dijelova sustava za teret.

U praksi klasifikacijskog društva Bureau Veritas često se provode i tzv. pokusi bacanja. Naime, epruvete izrađene u pravoj veličini bacaju se u kontroliranim uvjetima, pri čemu se mjere tlakovi i deformacije za različitu visinu pada, nagnutost epruvete i masu epruvete.

Istraživanja oštećenja koja su prouzrokovana zapljuskivanjem i ispitivanja u naravi provode se kako bi se u danas raspoložive matematičke i fizikalne modele inkorporiralo iskustvo u cilju što točnijeg ocjenjivanja podobnosti strukture. Važno je istaknuti da dosadašnji nadzor LNG brodova potvrđuje da se radi o prilično sigurnim brodovima, pa je baza raspoloživih podataka o oštećenjima uslijed zapljuskivanja

(srećom) prilično skromna. Kod tankera za prijevoz nafte situacija je slična, ali glavni razlog tome je što su stanja djelomične napunjenosti njihovih tankova prilično rijetka.

Trenutno se ulažu veliki napor u razvoj mjernih tehnika za modele u pravoj veličini zbog boljeg razumijevanja i kontrole fenomena zapljuskivanja i njegovih učinaka na velikim LNG brodovima.

3.3. Hidroelastična interakcija fluida i strukture

Vjerojatno najvažniji ali i najsloženiji aspekt u problemima udarnih opterećenja uslijed zapljuskivanja predstavlja hidroelastična interakcija fluid–struktura. Naime, prilikom zapljuskivanja mogu se javiti ekstremno visoki tlakovi čije direktno prenošenje na strukturu ne bi bilo ni opravdano ni točno. Dinamička opterećenja uslijed zapljuskivanja trebaju se promatrati imajući u vidu njihovu distribuciju u vremenu i prostoru. Prema [10], potpuno spregnute hidroelastične simulacije pokazale bi, da čak i kada se ekstremno visoki tlak pojavi lokalno, on nema odlučujući utjecaj na razinu naprezanja u strukturi. Nadalje, može se pokazati da bi čak i vrlo male promjene u relativnoj geometriji za vrijeme udara mogle značajno promijeniti maksimalni iznos udarnog tlaka, ali distribucija naprezanja unutar strukture ostala bi gotovo nepromijenjena.

Prikladno je spomenuti napredni istraživački rad od strane klasifikacijskog društva Bureau Veritas na ključnim pitanjima za hidroelastičnu analizu udara. Naime, razvijeni su semi–analitički modeli koji kombiniraju asimptotske modele toka fluida s komercijalnim softverima za proračun strukturnog odziva metodom konačnih elemenata (FEM).

Kada je riječ o LNG sadržaju, vrijeme trajanja udara je vrlo kratko (manje od milisekunde). To nam omogućuje da se zanemare neki, za CFD analize, ograničavajući čimbenici kao što su: viskoznost fluida, napetost površine, gravitacijski efekti itd. Na taj način jednostavnije je usredotočiti se na druga bitna obilježja cijelog promatranog sustava poput stlačivosti fluida, prisutnosti plina u zoni udara, mjehurića plina u valnoj fronti, fleksibilnosti stjenke i sl. Štoviše, moguće je pojednostavniti lokalne analize kombinirajući analitičke i numeričke metode, kada je sam CFD neprikladan.

Prema istraživanjima klasifikacijskog društva Bureau Veritas najprikladnija metodologija za procjenu ponašanja strukture u uvjetima zapljuskivanja mogla bi se razviti kroz sljedeće korake [10]:

- identifikacija kritičnih udara i uvjeta pod kojima se udari javljaju rabeći raspoložive alate (modelska ispitivanja u smanjenom mjerilu i numeričke simulacije),
- razmatranje sustava tanka i podupiruće čelične strukture, rabeći odgovarajuće testove za određivanje strukturnih značajki (statička i dinamička opterećenja u kriogenim uvjetima),
- udarni testovi sa epruvetama u stvarnoj veličini (pokusi bacanja i sl.) u uvjetima kontroliranog udara, rabeći pouzdanu laboratorijsku opremu, za procjenu čvrstoće strukture,
- dinamička analiza (uglavnom pomoću FEM–a) provjerenog numeričkog modela, za procjenu izdržljivosti strukture izvan stanja koja se mogu simulirati prikladnim udarnim testovima sa epruvetama (velike udarne brzine LNG–a na točki vrenja, struktura u kriogenim uvjetima).

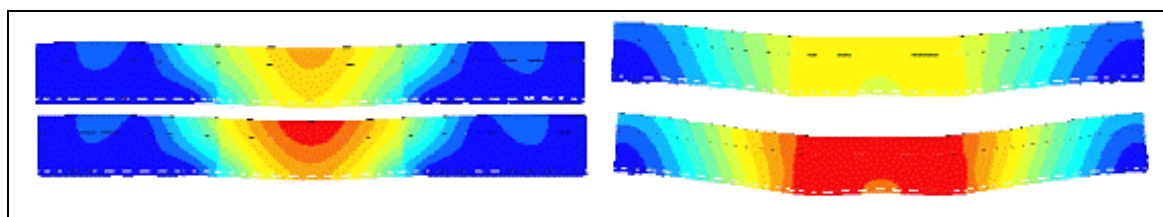
Vrlo je važno napomenuti da je promatranje (analiza) impulsnog problema u hidroelastičnoj interakciji iznimno složeno što se tiče numeričkog rješavanja. Stvarni tlak na stjenkama tanka za ukapljeni plin mogao bi se izraziti kao suma tlaka koji bi se dobio u sudaru s potpuno krutom stjenkom (određen modelskim testom) i dodatnog tlaka uslijed interakcije fluid–struktura (tzv. hidroelastični dio) [13]:

$$p(x, t) = p_{\text{rigid}}(x, t) + p_{\text{HE}}(x, t) \quad (3.1)$$

Takvo rastavljanje (dekompozicija) tlaka uslijed zapljuskivanja slično je rastavljanju hidrodinamičkog opterećenja plutajućih struktura na difrakcijsku i radijacijsku silu, pri čemu difrakcijska komponenta podrazumijeva silu kada je plutajuća struktura fiksna a radijacijska komponenta je dodatak uslijed gibanja koji se izračuna kao dio rješenja jednadžbe gibanja plutajuće strukture.

Obično, kada se identificiraju uvjeti pod kojima se udar javlja i pravilno determinira njihova povezanost s geometrijom, udarnom brzinom i relativnim kutom nailaska na stjenku, semi–analitički modeli temeljeni na asimptotskim teorijama koriste se za rješavanje hidrodinamičkog dijela problema, te kao rezultat daju opterećenja koja se zatim prenose na strukturu.

Pod određenim uvjetima udara nužno je raditi spregnutu analizu. To je osobito izraženo pri velikim udarnim brzinama, kod malog kuta udara i za vrlo elastične strukture. Zanimljivo je pogledati rezultate prikazane u [10] gdje je dana usporedba deformacija dobivenih pomoću spregnutog i nespregnutog pristupa pod jednakim opterećenjem, kako prikazuje sljedeća slika:



Slika 3.6. Deformacije za spregnuti (lijevo) i nespregnuti (desno) model [10]

4. PRAVILA KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA

Problem zapljuskivanja prema pravilima klasifikacijskih društava tretira se dvojako, uglavnom ovisno o vrsti tereta u promatranom tanku, odnosno ovisno o namjeni broda. Naime, već je u prethodnom dijelu rada navedeno kako vrsta fluida i njegove značajke imaju veliki utjecaj na zapljuskivanje, ali treba voditi računa i o strukturi tanka koja se znatno razlikuje ovisno o tome radi li se o tankeru za prijevoz nafte, naftnih prerađevina, raznih kemikalija i sl. ili pak o brodu za prijevoz LNG-a. Struktura tankova kod tankera za prijevoz ukapljenog plina (Slika 5.2.) je znatno složenija od strukture tankova kod tankera za prijevoz nafte (Slika 5.1.), prvenstveno zbog izolacije koja služi za održavanje niskih temperatura, ali i zbog elastičnih membrana koje okružuju teret, pa je analiza zapljuskivanja za njih znatno složenija.

Kada je riječ o konstrukciji tankova kod tankera za prijevoz nafte (s dvostrukom oplatom) u pravilima klasifikacijskih društava mogu se naći izrazi koji određuju projektne vrijednosti tlaka uslijed zapljuskivanja, koje služe kao ulazni parametri za proračun dimenzija pojedinih strukturnih elemenata. Takvi izrazi rezultat su teorijskih promišljanja, numeričkih proračuna, eksperimentalnih istraživanja, te dugogodišnjeg praćenja ponašanja brodova u službi.

Budući da je već spominjani porast potreba za prijevozom ukapljenog plina novija pojava, još se ne mogu primjenjivati jedinstveni izrazi kojima bi se provjerilo udovoljavanje konstrukcije LNG brodova pravilima klasifikacijskih društava po pitanju opterećenja uslijed zapljuskivanja za sva moguća stanja krcanja, već se za takve brodove provjere izvršavaju preko procedura koje propisuju klasifikacijska društva, primjerice prema [13]. Procedure sadrže opis postupaka za određivanje stanja mora, određivanje okolišnih opterećenja, provođenje pokusa, provođenje numeričkih proračuna, načine prenošenja opterećenja uslijed zapljuskivanja na strukturu i sl.

U načelu, kada se osniva tank za prijevoz ukapljenog plina koji treba biti verificiran od strane klasifikacijskog društva njegova provjera se može izvršiti tzv. usporedbenim ili apsolutnim pristupom [13]. Usporedbeni pristup je pogodan za tankove uobičajene veličine i konvencionalnog oblika koji su slični tankovima čija je pogodnost dokazana dugogodišnjom eksploatacijom. U apsolutnom pristupu kreće se od modelskih testova kojima se procjenjuje opterećenje uslijed zapljuskivanja u vremenu. Tako dobivena vremenska distribucija opterećenja najčešće se aproksimira trokutom kojeg karakterizira maksimalni iznos opterećenja, vrijeme porasta i vrijeme trajanja. Opterećenja se zatim narinu na matematički model koji se najčešće rješava metodom konačnih elemenata (FEM) i na taj način se dobiju prve informacije o mogućem ponašanju konstrukcije. Apsolutni pristup uglavnom nema alternativu kada se osniva tank novog oblika jer bilo kakva usporedba s tankovima uobičajenih oblika može biti potpuno nepouzdana. Ukoliko su novi i stari projekt tanka slični može se utvrditi relativno smanjenje ili povećane tlaka uslijed zapljuskivanja. Projektno opterećenje uslijed zapljuskivanja za strukturnu analizu novog projekta moglo bi se prikazati sljedećim izrazom:

$$p_{new_design}(t) = \left[\frac{(p_{max})_{new_design}}{(p_{max})_{old_design}} \right]_{sloshing_analysis} [p_{old_design}(t)]_{model_test} \quad (4.1)$$

U okviru ovog rada neće se navoditi svi izrazi za određivanje opterećenja uslijed zapljuskivanja, odnosno izrazi za određivanje dimenzija strukturnih elemenata na temelju tih opterećenja, ali je zgodno prikazati neki od izraza iz [14] kojim se može proračunati tlak uslijed zapljuskivanja, kako bi se potkrijepilo ranije napisano, da su trenutna pravila klasifikacijskih društava rezultat teorijskih razmatranja,

numeričkih proračuna i eksperimentalnih istraživanja u koje je, na temelju praćenja brodova u službi, inkorporirano iskustvo.

Primjerice tlak na poprečnu nepropusnu pregradu uslijed zapljuskivanja prilikom uzdužnog gibanja tekućine u slučaju djelomičnog punjenja (vrijedi za tankere za prijevoz nafte s dvostrukom oplatom iznad 150 m duljine) može se uzeti prema izrazu koji propisuje klasifikacijsko društvo Det Norske Veritas [14]:

$$P_{slh-ing} = \rho g l_{slh} f_{slh} \left[0,4 - \left(0,39 - \frac{1,7 l_{slh}}{L} \right) \frac{L}{350} \right] \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4.2)$$

gdje je:

- ρ – gustoća fluida u tanku [t/m^3] – ne uzimati manje od 1,025,
- g – gravitacijsko ubrzanje [m/s^2],
- l_{slh} – efektivna duljina zapljuskivanja za određenu visinu punjenja [m],
- f_{slh} – koeficijent,
- L – duljina broda [m].

Efektivna duljina zapljuskivanja spomenuta u izrazu (4.2) računa se prema:

$$l_{slh} = \frac{(1 + n_{wash-t} \alpha_{wash-t})(1 + f_{wf} \alpha_{wf}) l_{tk-h}}{(1 + n_{wash-t})(1 + f_{wf})} \quad [\text{m}] \quad (4.3)$$

Oznake korištene u izrazu (4.3) predstavljaju:

- n_{wash-t} – broj poprečnih pljusaka u tanku,
- α_{wash-t} – koeficijent poprečnih pljusaka,
- f_{wf} – faktor koji uzima u obzir broj okvirnih rebara i broj poprečnih pljusaka,
- α_{wf} – koeficijent okvirnih rebara,
- l_{tk-h} – duljina teretnog tanka na vodnoj liniji [m].

Koeficijent poprečnih pljusaka jednak je:

$$\alpha_{wash-t} = \frac{A_{opn-wash-t}}{A_{tk-t-h}} \quad (4.4)$$

Brojnik razlomka u prethodnom izrazu predstavlja ukupnu površinu otvora pljusaka ispod razine fluida u tanku [m^2], dok nazivnik predstavlja ukupni poprečni presjek ispod razine fluida [m^2].

Faktor koji uzima u obzir broj okvirnih rebara i broj poprečnih pljusaka računa se prema:

$$f_{wf} = \frac{n_{wf}}{(1 + n_{wash-t})} \quad (4.5)$$

gdje je:

- n_{wf} – broj okvirnih rebara u tanku.

Koeficijent okvirnih rebara računa se prema:

$$\alpha_{wf} = \frac{A_{opn-wf-h}}{A_{tk-t-h}} \quad (4.6)$$

Brojnik razlomka u izrazu (4.6) predstavlja ukupnu površinu otvora na poprečnom presjeku u ravnini okvirnih rebara ispod razine fluida [m²], dok je u nazivniku jednako kao za izraz (4.4) ukupni poprečni presjek ispod razine fluida [m²].

Ukoliko se oblik rebara mijenja uzduž tanka koeficijent okvirnih rebara se može uzeti kao prosječna vrijednost koeficijenata za sva okvirna rebara prema:

$$\alpha_{wf} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{A_{opn-wf-h-i}}{A_{tk-t-h-i}}}{n_{wf}} \quad (4.7)$$

Koeficijent f_{slh} iz izraza (4.2) računa se prema sljedećem izrazu:

$$f_{slh} = 1 - 2 \left(0,7 - \frac{h_{fill}}{h_{max}} \right)^2 \quad (4.8)$$

gdje je:

h_{fill} – visina punjenja mjerena od unutarnjeg dna tanka [m],

h_{max} – maksimalna visina tanka [m].

Prethodni primjer pokazuje da se u izrazima koji su propisani od klasifikacijskih društava i za najjednostavnije pojave zapljuskivanja vrlo teško može nazrijeti povezanost s fizikalnom pozadinom problema.

U okviru ovog poglavlja, dalje je stavljen naglasak na izrazima klasifikacijskih društava koji imaju definicijski karakter u problematici zapljuskivanja u tankovima.

4.1. Opis punjenja i prirodni periodi fluida u tankovima

4.1.1. Opis punjenja

Prema klasifikacijskom društvu Lloyd's Register [6] punjenje se može definirati kao nisko ili visoko, odnosno moguće je definirati tzv. faktor punjenja prema čijem će se iznosu razlučiti o kojem se tipu punjenja radi.

Faktor punjenja F_C definiran je sljedećim izrazom:

$$F_C = \frac{F}{H} + 6,0 \frac{\theta_0}{\cosh(F_r)} \quad (4.9)$$

U izrazu (4.9) korištene oznake predstavljaju:

F – razina punjenja [m],

H – ukupna visina tanka [m],

θ_0 – kut čija se vrijednost uzima kao veća između θ_1 i θ_2 [°],

F_r – efektivni omjer punjenja.

Kut θ_1 jednak je:

$$\theta_1 = \theta e^{\frac{(T_n - S_n)^2}{k}} \quad [\text{rad}] \quad (4.10)$$

pri čemu je:

- θ – kut koji je jednak θ_{\max} ili ϕ_{\max} ovisno radi li se o posrtanju ili ljuljanju [°],
 T_n – prirodni period fluida [s],
 S_n – prirodni period broda [s],
 k – koeficijent (za posrtanje $k = 6$, za ljuljanje $k = 4$).

Iznos kuta θ_2 za posrtanje jednak je:

$$\theta_2 = 0,052^\circ$$

Iznos kuta θ_2 za ljuljanje jednak je:

$$\theta_2 = 0,105^\circ$$

Efektivni omjer punjenja računa se prema:

$$F_r = \frac{\pi \left(F - b \sqrt{\frac{n}{n+1}} \right)}{L_s} \quad (4.11)$$

gdje je:

- b – visina primarnih ukrepa dna [m],
 n – broj primarnih ukrepa dna,
 L_s – efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka [m].

Za nisko punjenje obično vrijedi:

$$F_c \leq 1,02 \quad (4.12)$$

Međutim, kada su prirodni periodi fluida i broda vrlo bliski, faktor punjenja će redovito biti veći od 1,02, a u tom slučaju nisko punjenje se može definirati sljedećim izrazom:

$$\frac{F}{L_s} \leq 0,21 \quad (4.13)$$

Bilo koja druga razina punjenja smatra se visokim punjenjem.

4.1.2. Prirodni periodi fluida

Prirodni period fluida kod posrtanja T_{np} ili ljuljanja T_{nr} definiran je izrazom [6]:

$$T_n = \sqrt{\frac{4\pi L_s}{g \tanh(F_r)}} \quad [\text{s}] \quad (4.14)$$

4.2. Maksimalna njihanja kroz vijek korištenja broda

Za određivanje njihanja broda, kad god je moguće, treba provesti direktne proračune u kojima treba uzeti stvarnu formu broda i distribuciju masa. Takvi proračuni uključuju računanje odziva na pravilnim valovima pomoću vrpčaste teorije, kratkoročne odzive na nepravilnim valovima na temelju spektra mora, te predviđanje dugoročnih odziva koristeći statističku distribuciju stanja mora.

Klasifikacijsko društvo Lloyd's Register navodi iskustvene izraze, dobivene na bazi statističke procjene, koji odgovaraju ekstremnom njihanju broda i ubrzanjima s vjerojatnošću pojavljivanja jednom u dvadeset godina [6]. Izrazi su približni i vrijede za brodove uobičajenih proporcija.

4.2.1. Prirodni period ljuljanja broda

Prirodni period ljuljanja broda približno se može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$S_{nr} = 2,35 \frac{r}{\sqrt{GM}} \quad [s] \quad (4.15)$$

gdje je:

$\frac{r}{GM}$ – polumjer okretanja ljuljanja [m] – može se uzeti kao $0,34 B$ (širina broda),
– poprečna metacentarska visina s korekcijom slobodne površine [m].

Za brodove kod kojih polumjer okretanja ili metacentarska visina značajno variraju ovisno o stanju krcanja (tankeri, brodovi za rasuti teret), potrebno je izračunati prirodne periode za sva stanja krcanja (slično vrijedi i za prirodni period posrtanja broda).

4.2.2. Prirodni period posrtanja broda

Prirodni period posrtanja broda može se odrediti prema izrazu:

$$S_{np} = 3,5 \sqrt{TC_B} = 3,5 \sqrt{\frac{\nabla}{LB}} \quad [s] \quad (4.16)$$

gdje je:

T – srednji gaz broda [m],
 C_B – blok koeficijent,
 ∇ – istisnina broda [m³],
 L – duljina broda [m],
 B – širina broda [m].

4.2.3. Maksimalni kut ljuljanja kroz vijek korištenja broda

Maksimalni kut ljuljanja jednak je:

$$\phi_{\max} = \left(14,8 + 3,7 \frac{L}{B} \right) e^{-0,0023 L} \quad [^\circ] \quad (4.17)$$

4.2.4. Maksimalni kut posrtanja kroz vijek korištenja broda

Maksimalni kut posrtanja jednak je:

$$\theta_{\max} = \left(32,7 - 8,2 C_B \right) e^{-0,001 L \left(4,9 + \frac{C_B}{2} \right)} \quad [^\circ] \quad (4.18)$$

4.2.5. Maksimalne amplitude poniranja i zanošenja

Maksimalna amplituda poniranja kroz vijek korištenja broda može se odrediti prema izrazu (4.19), ali ne treba ju uzimati većom od 4 m.

$$Z_{\max} = 10e^{-0,0032L} \quad [\text{m}] \quad (4.19)$$

Maksimalna amplituda zanošenja kroz vijek korištenja broda može se izračunati prema (4.20), ali ne treba ju uzimati većom od 2,5 m.

$$Y_{\max} = 5e^{-0,0025L} \quad [\text{m}] \quad (4.20)$$

4.2.6. Maksimalno vertikalno ubrzanje kroz vijek korištenja broda

Maksimalno vertikalno ubrzanje kroz vijek korištenja broda, na uzdužnoj poziciji x od glavnog rebra računa se prema:

$$a = \pm g a_0 \sqrt{1 + \left(5,3 - \frac{45}{L}\right)^2 \left(\frac{x}{L} + 0,05\right)^2 \left(\frac{0,6}{C_B}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad [\text{m/s}^2] \quad (4.21)$$

pri čemu je:

$$a_0 = 0,2 \frac{v}{\sqrt{L}} + \frac{34 - \frac{600}{L}}{L} \quad (4.22)$$

gdje je:

v – brzina broda u službi [čv].

4.3. Utjecaj pljuskača na tlakove uslijed zapljuskivanja

Pljuskače, čija je površina često i do 85% površine poprečnog presjeka tanka, smatraju se djelotvornima po pitanju smanjenja učinaka zapljuskivanja jer smanjuju duljinu slobodne površine. Prema [6] utjecaj pljuskača se može procijeniti koristeći pristup totalne energije primijenjen na raspodjelu opterećenja unaprijed izračunatu za tank.

Ukupni tlak na pregradu s uključenim utjecajem pljuskača jednak je:

$$P = P_s + \frac{P_D}{(1 + \kappa)} \quad (4.23)$$

Oznake u (4.23) predstavljaju:

P_s – statički tlak bez utjecaja pljuskače [kN/m^2],

P_D – dinamički tlak bez utjecaja pljuskače [kN/m^2],

κ – koeficijent utjecaja pljuskače.

Dinamički tlak bez utjecaja pljuskače jednak je:

$$P_D = P_T - P_s \quad (4.24)$$

pri čemu je:

P_T – ukupni proračunati tlak bez utjecaja pljuskače [kN/m^2].

Koeficijent utjecaja pljuskače κ određen je sljedećim izrazom:

$$\kappa = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} \quad (4.25)$$

Veličina λ u izrazu (4.25) računa se kao omjer površine otvora pljuskače i ukupne površine pljuskače.

Praksa pokazuje da se u slučajevima, kada su umjesto pljuskača postavljena rebra ili poprečni elementi, može očekivati smanjenje tlaka na nepropusnoj pregradi na oko 80% dinamičkog tlaka koji bi nastao bez rebara ili poprečnih elemenata. Takvo smanjenje javlja se ukoliko se postave samo 2 ili 3 poprečna elementa, s tim da se dinamički tlak dodatno ne bi više smanjivao ukoliko bi se broj poprečnih elemenata povećavao.

4.4. Kombinirano opterećenje uslijed zapljuskivanja

Budući da su analize zapljuskivanja temeljene na 2D numeričkim modelima, maksimalno opterećenje uslijed zapljuskivanja dobiveno za gibanje u uzdužnoj i poprečnoj ravnini potrebno je kombinirati kako bi se dobio izraz kojim se može izračunati opterećenje u trodimenzionalnim kutovima tanka. Prema ABS-u za kombinirano opterećenje može se koristiti sljedeći izraz [13]:

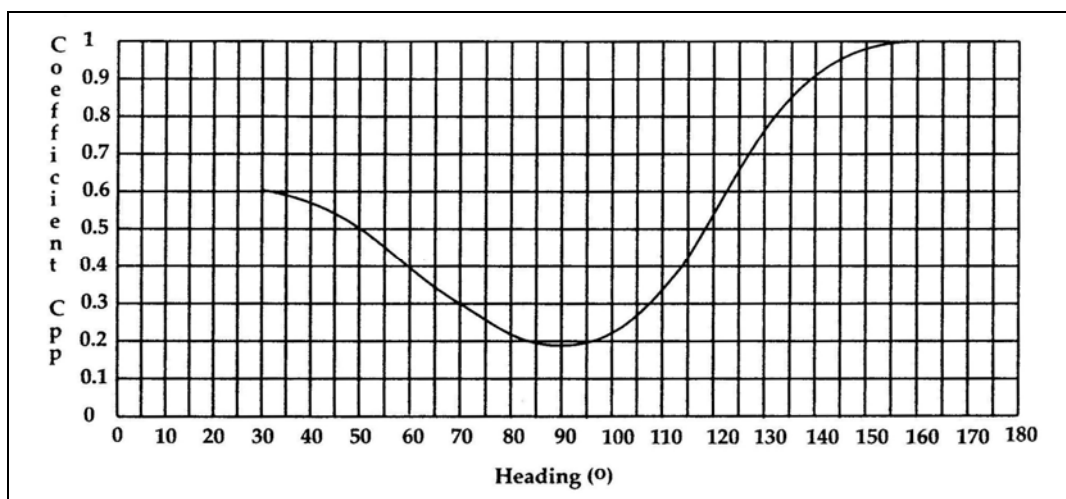
$$(p_{\max})_{\text{comer}} = \sqrt{\{1,5(p_{\max})_{\text{longitudinal}}\}^2 + (p_{\max})_{\text{transverse}}^2} \quad (4.26)$$

Faktor 1,5 za maksimalno opterećenje od gibanja u uzdužnoj ravnini uvodi se da bi se obuhvatio trodimenzionalni efekt gibanja koji se zanemaruje u 2D simulaciji.

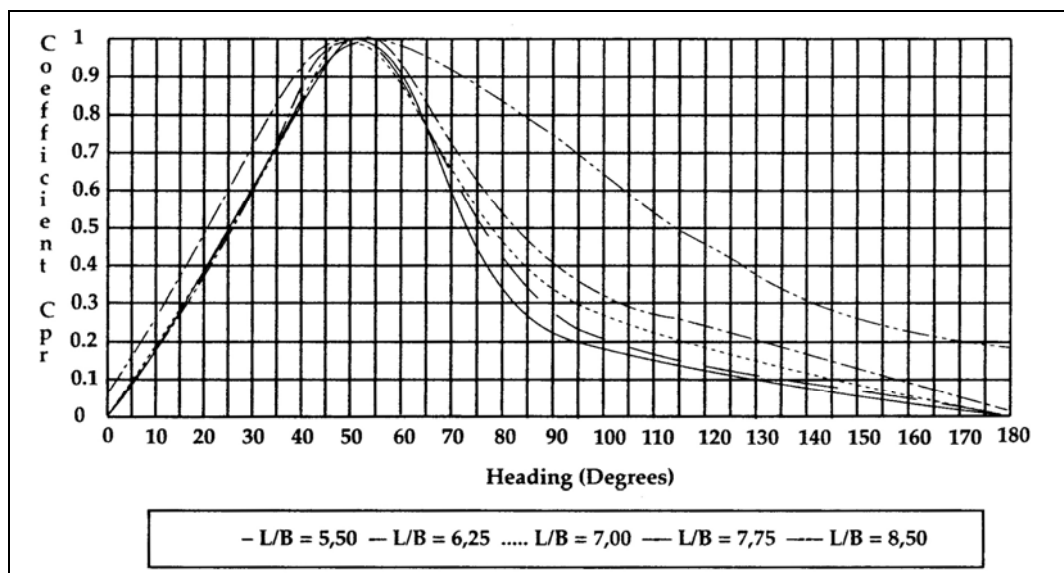
Prema LR-u opterećenje u kutovima bi se moglo izračunati na sličan način, također kombiniranjem gibanja u uzdužnoj i poprečnoj ravnini broda, samo što se korekcijski faktori uzimaju kao funkcija kuta napredovanja ($0^\circ \leq \chi \leq 180^\circ$);

$$(p_{\max})_{\text{comer}} = \text{Max} \left(\sqrt{C_{pp}(\chi)(p_{\max})_{\text{longitudinal}}^2 + C_{pr}(\chi)(p_{\max})_{\text{transverse}}^2} \right) \quad (4.27)$$

Korekcijski faktori za posrtanje $C_{pp}(\chi)$ i ljuljanje $C_{pr}(\chi)$ dijagramski su prikazani na sljedećim slikama (u [6] su navedeni i tablični podaci za dijagrame):



Slika 4.1. Korekcijski faktor za posrtanje (C_{pp}) [6]

Slika 4.2. Korekcijski faktor za ljuljanje (C_{pr}) [6]

4.5. Pretpostavke za pojavu zapljuskivanja i kritične razine punjenja

4.5.1. Pretpostavke za pojavu zapljuskivanja

Na temelju iskustava klasifikacijskog društva Lloyd's Register i numeričkih analiza brojnih slučajeva u praksi, smatra se da može doći do značajnog povećanja gibanja fluida ukoliko su ispunjeni sljedeći uvjeti [6]:

- razlika prirodnih perioda ljuljanja fluida i broda je manja od 5 sekundi,
- prirodni period posrtanja fluida je veći od prirodnog perioda posrtanja broda umanjeno za 3 sekunde.

Dakle, može se reći da se značajnije povećanje gibanja fluida javlja ukoliko su prirodni periodi tekućine i prirodni periodi broda bliski, što je, imajući u vidu na početku rada spomenutu rezonantnu prirodu fenomena zapljuskivanja, i intuitivno jasno.

Također, referirajući se na izloženo u prethodnim poglavljima o brojnim veličinama koje utječu na intenzitet zapljuskivanja u brodskim tankovima, može se reći da, osim dimenzija i oblika tanka, vrste i razine punjenja, te netom spominjanih prirodnih perioda, važan utjecaj na zapljuskivanje imaju metacentarska visina i gaz broda (jer imaju veliki utjecaj na pomorstvena svojstva broda) [15].

Za sljedeće slučajeve smatra se da je značajno povećanje dinamičkog opterećenja tankova uslijed zapljuskivanja malo izgledno [7]:

- za tankove ukrepljene s unutarnje strane s dvije ili više palubnih podveza (ljuljanje), odnosno poprečnjaka (posrtanje), gdje je udaljenost podveze, odnosno sponje od kraja tanka manja ili jednaka 25% širine, odnosno duljine tanka,
- za razine punjenja niže od bilo kojeg nosača dna,
- za razine punjenja više od 97% pune visine glatkih tankova,
- za razine punjenja manje od 10% pune visine glatkih tankova.

4.5.2. Definiranje kritičnih razina punjenja

Raspon kritičnih razina punjenja, kad god je moguće potrebno je odrediti raspoloživim numeričkim postupcima. Prema LR-u kritične razine punjenja mogu se (približno) odrediti pomoću izraza [6]:

$$F_{crit} = \frac{100}{H} \left(\frac{L_s}{2\pi} \ln \frac{1+\eta}{1-\eta} + b \sqrt{\frac{n}{n+1}} \right) \quad [\%] \quad (4.28)$$

Oznake u (4.28) predstavljaju:

- H – ukupna visina tanka [m],
- L_s – efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka [m],
- η – faktor povezan s prirodnim periodom broda (ljuljanja ili posrtanja),
- b – visina primarnih ukrepa dna [m],
- n – broj primarnih ukrepa dna.

4.6. Analiza pojedinih tankova u ovisnosti o uvjetima plovidbe

Ako je stanje krcanja broda takvo da su svi tankovi djelomično ispunjeni teretom, prema LR-u moraju se analizirati tankovi zajedno s odgovarajućim stanjem mora kako propisuje sljedeća tablica [6]:

Tablica 4.1. Tankovi koje treba analizirati ovisno o uvjetima plovidbe

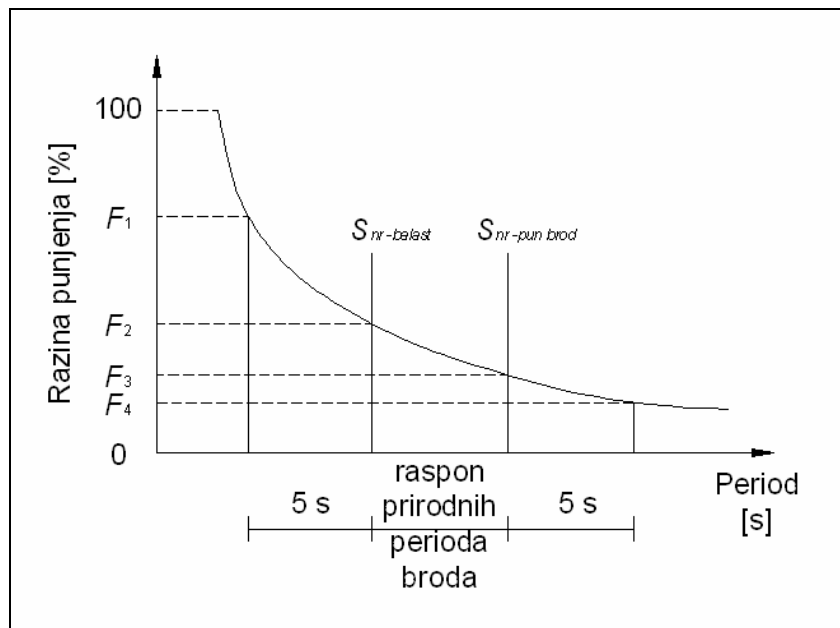
TANK	UVJETI PLOVIDBE			
	Valovi u pramac	Valovi koso u pramac	Bočni vjetar	Valovi koso u krmu
Pramčani tank				
Krmeni tank				
Središnji tank				
Najveći tank				

Kada su predviđene proizvoljne razine krcanja tankova, potrebno je provjeriti sva neopasna stanja krcanja. Stanja krcanja koja dovode do najkritičnijih uvjeta po pitanju zapljuskivanja su: djelomično punjenje svih tankova, stanje odijeljenog balasta i balast u olujnim uvjetima. Iskustvo pokazuje da su udarni tlakovi veći što je prirodni period broda manji.

4.7. Odobravanje broda za neograničene razine punjenja

Kada brod treba dobiti odobrenje za neograničene razine punjenja moguća su mnoga, proizvoljna stanja krcanja [7]. Da bi se mogao obuhvatiti cijeli raspon mogućih stanja krcanja, moraju se uzeti u razmatranje stanje potpuno nakrcanog broda i stanje broda u balastu. Ova dva stanja predstavljaju donju i gornju granicu mogućih raspona prirodnih perioda broda. Potrebno je analizirati zapljuskivanje u slučaju ljuljanja i posrtanja broda.

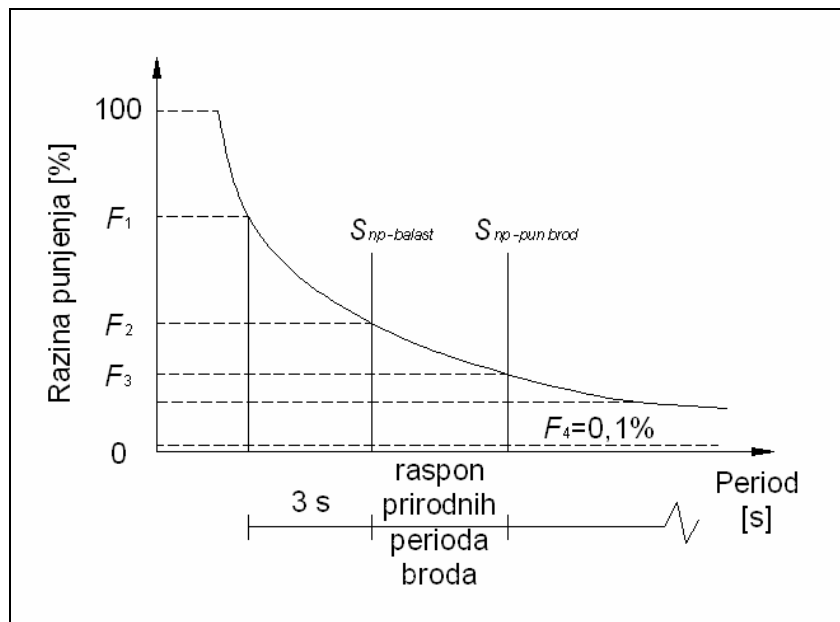
Zbog zahtjeva za neograničene razine punjenja raspon perioda gibanja, kritičan po pitanju pojave zapljuskivanja, kreće se od $(S_{nr-balast} - 5)$ do $(S_{nr-pun\ brod} + 5)$ sekundi kod ljuljanja, odnosno od $(S_{np-balast} - 3)$ do beskonačnosti za posrtanje [6].



Slika 4.3. Prirodni periodi za ljuľanje [6]

Za zapljuskivanje kod ljuľanja, raspon kritiĉnih razina punjenja kreće se od F_1 do F_4 . Sve razine punjenja izmeľu F_1 i F_4 moraju se prouĉiti:

- za razine punjenja od F_1 do F_2 koristi se $S_{nr-balast}$,
- za razine punjenja od F_3 do F_4 koristi se $S_{nr} = T_n$ (vidi izraz (4.14)),
- za razine punjenja od F_3 do F_4 koristi se $S_{nr-pun brod}$.



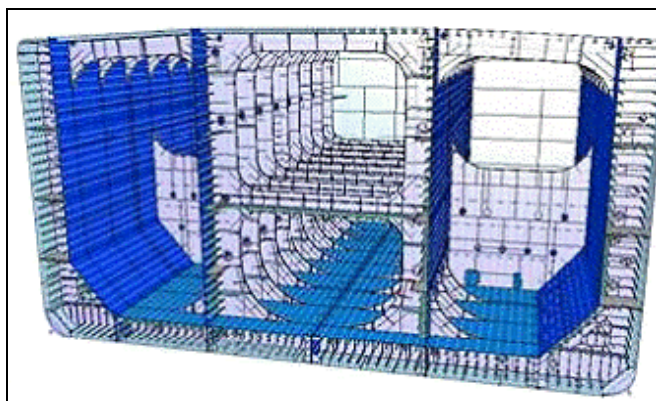
Slika 4.4. Prirodni periodi za posrtanje [6]

Takoľer i kod posrtanja, raspon kritiĉnih razina punjenja kreće se od F_1 do F_4 pri ĉemu je $F_4 = 0,1\%$. Sve razine punjenja izmeľu F_1 i F_4 moraju se prouĉiti:

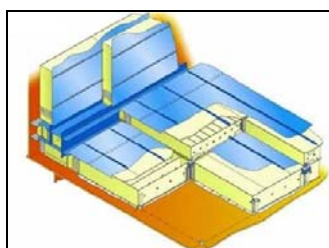
- za razine punjenja od F_1 do F_2 koristi se $S_{np-balast}$,
- za razine punjenja od F_3 do F_4 koristi se $S_{np} = T_n$ (vidi izraz (4.14)),
- za razine punjenja od F_3 do F_4 koristi se $S_{np-pun brod}$.

5. ZNAČAJKE MATERIJALA U ANALIZI UČINAKA ZAPLJUSKIVANJA

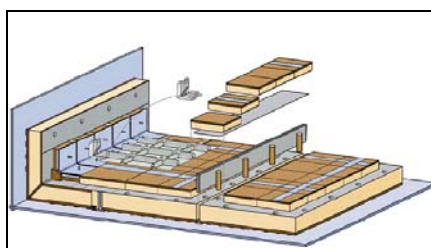
Važnost statičkih i dinamičkih značajki materijala u analizi zapljuskivanja, imajući na umu ranije objašnjenu složenost prisutnih prirodnih fenomena i posebnosti strukture tankova, nije potrebno detaljnije obrazlagati. Najjednostavnije analize što se tiče strukturnog odziva su one u kojima materijal ima izotropna svojstva, primjerice kod čeličnih tankova tankera za prijevoz nafte. Okruženje tankova za prijevoz ukapljenog plina sastoji se od različitih materijala kao što su: posebni limovi, razne vrste guma, šperploče i poliuretanske pjene. Ponašanje takvih materijala je izotropno, ortotropno ili viskoelastično [13]. Budući da se proračuni zapljuskivanja i njegovih učinaka provode u više razina, u nekim razinama proračuna, ovisno o zahtjevima, ponašanja materijala se mogu pojednostavniti ili opisivati približnim teorijama.



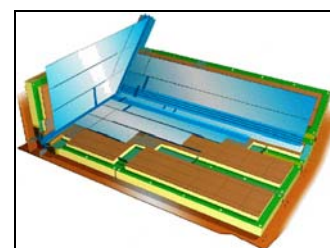
Slika 5.1. Struktura čeličnog tanka tankera za naftu [16]



a) No96



b) Mark III



c) CS1

Slika 5.2. Prikaz strukture membranskih tankova za prijevoz ukapljenog plina [8]

5.1. Izotropni materijali

Za materijale čija su fizikalno–mehanička svojstva u svim smjerovima jednaka kažemo da su izotropni. Kod izotropnih materijala veza između naprezanja i deformacije je najjednostavnija [13]:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (5.1)$$

gdje je:

- σ_{ij} – komponenta tenzora naprezanja,
- ε_{ij} – komponenta tenzora deformacije,

μ, λ – Laméove konstante.

Lamé-ove konstante u izrazu (5.1) definirane su preko Youngova modula elastičnosti E i Poissonova koeficijenta ν ;

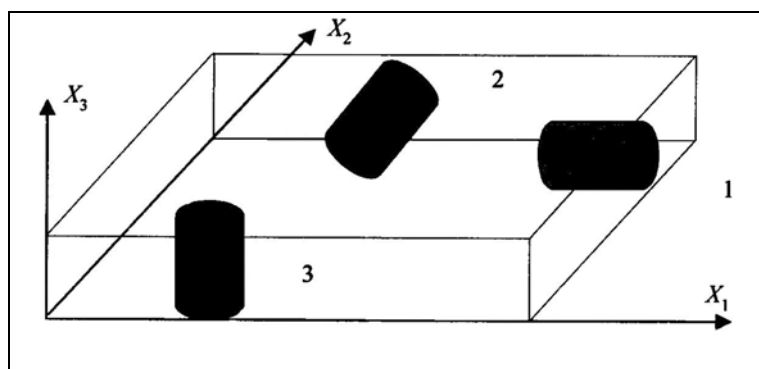
$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.2)$$

odnosno:

$$\lambda = \frac{\nu E}{[(1+\nu)(1-2\nu)]} \quad (5.3)$$

5.2. Ortotropni materijali

Ortotropni materijali su oni kod kojih su fizikalno–mehanička svojstva jednaka u određenim smjerovima. Šperploča je primjer ortotropnog materijala koji se koristi u izradi sustava tereta za prijevoz ukapljenog plina. Mehaničko ponašanje ortotropnih materijala karakterizira 9 nezavisnih parametara. Ukoliko se razmotri primjer šperploče, kao ortotropnog materijala, i smjerovi se obilježe sa X_1 , X_2 i X_3 kako prikazuje Slika 5.3. (shematski su prikazane i epruvete za svaki smjer), vezu između naprezanja i deformacije moguće je prikazati izrazom (5.4).



Slika 5.3. Shematski prikaz koordinatnog sustava šperploče [13]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (5.4)$$

Također vrijedi:

$$\begin{aligned} E_1 \nu_{21} &= E_2 \nu_{12} \\ E_2 \nu_{32} &= E_3 \nu_{23} \\ E_3 \nu_{13} &= E_1 \nu_{31} \end{aligned} \quad (5.5)$$

U konstitutivnim jednadžbama izraza (5.4) elastične konstante (moduli) su: E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} i G_{23} .

5.3. Viskoelastični materijali

Viskoelastični materijali imaju svojstva elastičnih tijela i viskoznih tekućina. Njihova naprezanja ovise o brzini deformacije. Opći oblik veze između naprezanja i deformacije prikazuje sljedeći izraz [13]:

$$\sigma_{ij} = \int_{-\infty}^t 2\mu(t-\xi) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \xi} d\xi + \delta_{ij} \int_{-\infty}^t K(t-\xi) \frac{\partial e_{kk}}{\partial \xi} d\xi \quad (5.6)$$

gdje je:

e_{ij} – volumenska deformacija, $e_{ij} = \varepsilon_{kk}$,

e_{ij} – kutna deformacija, $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$

Modul smicanja iz izraza (5.6) može se izraziti redom (Prony):

$$\mu(t) = \mu_{\infty} + \sum_{i=1}^n \mu_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i^{\mu}}\right) \quad (5.7)$$

Modul prostornog popuštanja iz izraza (5.6) također se može razviti u red (Prony):

$$K(t) = K_{\infty} + \sum_{i=1}^n K_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i^K}\right) \quad (5.8)$$

Veličine μ_{∞} , μ_i , τ_i^{μ} , K_{∞} , K_i i τ_i^K kalibriraju se na temelju eksperimentalnih podataka.

Ukoliko se u obzir uzme samo jedan član u redovima (5.7) i (5.8), konstitutivni model postaje znatno jednostavniji. Za slučaj jednoosnog razvlačenja veza deformacije i naprezanja dana je sljedećim izrazom:

$$\sigma = \int_0^t E(t-\xi) d\varepsilon \quad (5.9)$$

Youngov modul elastičnosti u ovisnosti o vremenu jednak je:

$$E(t) = E_{\infty} + (E_0 - E_{\infty}) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (5.10)$$

gdje je:

E_0 – trenutni modul elastičnosti [N/mm²],

E_{∞} – modul elastičnosti nakon relaksacije [N/mm²],

τ – vrijeme relaksacije [s].

Više o pokusima i matematičkim modelima vezanim za viskoelastične materijale može se naći u [17].

Poliuretanska pjena, koja služi kao izolacija kod tankova za ukapljeni plin u nekim razinama proračuna tretira se kao viskoelastičan medij.

6. TEHNIČKE ZNAČAJKE ANALIZIRANOG BRODA

Posebnosti tankera koji je razmatran u okviru ovog rada su: relativno mali omjer duljine prema širini, manji gaz te veća brzina plovidbe u odnosu na tradicionalne tankere.

Veća širina broda rezultira povećanjem kapaciteta skladišnih prostora, dok manji gaz omogućuje lakši pristup lukama i smanjuje rizik od nasukavanja (engl. *grounding*), što bi trebao biti korak naprijed i u zaštiti okoliša.

Druga prednost ovog broda je opremljenost sa dva nezavisna sustava propulzije, smještena u dvije odvojene strojarnice (dva pogonska stroja MAN B&W 6S46 MC-C), što smanjuje rizik od nesreće kojoj bi uzrok mogao biti zatajenje pogonskog sustava.

Glavne dimenzije broda dane su u sljedećoj tablici:

Tablica 6.1. Glavne dimenzije broda

Dimenzija	Oznaka	Vrijednost
Duljina preko svega	L_{OA}	182,90 m
Duljina između okomica	L_{PP}	175,50 m
Širina broda	B	40,00 m
Visina broda	H	17,90 m
Gaz (pun brod)	T	13,00 m
Gaz (balast)	T_B	7,58 m

Niže su prikazane osnovne značajke broda, te nekoliko podataka² koji su neophodni za proračun zapljuskivanja.

Namjena broda:	prijevoz tekućeg tereta
Klasifikacijsko društvo:	Det Norske Veritas (DNV)
Nosivost:	65200 DWT
Koeficijent istisnine (pun brod):	0,840
Koeficijent istisnine (balast):	0,779
Brzina na pokusnoj plovidbi:	17,3 čv
Brzina u službi:	14,5 čv
Poprečna metac. visina (pun brod):	5,02 m
Poprečna metac. visina (balast):	12,65 m

Između brodogradilišta BRODOSPLIT i švedske brodarske kompanije STENA ugovorena je gradnja šest brodova tipa STENA P-MAX, a prvi brod u seriji, pod nazivom STENA PARIS, prikazan je na slikama na sljedećoj stranici.

² Podatke o brodu STENA PARIS ustupilo je brodogradilište BRODOSPLIT samo za potrebe ovog rada.



Slika 6.1. Brod STENA PARIS za vrijeme gradnje na navozu [18]



Slika 6.2. Brod STENA PARIS uz opremnu obalu [18]



Slika 6.3. Brod STENA PARIS u plovidbi [18]

Osim prethodno prikazanih tehničkih značajki broda, za provedbu proračuna zapljuskivanja potrebni su osnovni podaci o tankovima.

Tablica 6.2. Značajke tankova potrebne za proračun zapljuskivanja

TANK	Duljina tanka	Širina tanka	Visina tanka	Visina dvodna	Udalj. od sredine broda	Udalj. od CL	Gustoća tereta
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kg/m ³]
Središnji tank	25,9	18,6	15,9	2,0	8,6	9,3	920
Pramčani tank	25,9	15,9	15,9	2,0	61,8	6,6	920



Slika 6.4. Teretni prostori broda STENA PARIS [18]

7. PRORAČUN ZAPLJUSKIVANJA – POSTUPAK LLOYD'S REGISTER-A

Ovaj dio rada odnosi se na proračun zapljuskivanja prema SDA postupku, razvijenom u klasifikacijskom društvu Lloyd's Register [19]. Korišten je program „ShipRight“ (njegovi programski moduli), ustupljen od spomenutog klasifikacijskog društva za potrebe ovog rada.

Analizirano je gibanje fluida i njime prouzrokovana opterećenja u središnjem i pramčanom teretnom tanku broda STENA PARIS (vidi 6., Prilog A), uslijed ljuljanja i posrtanja broda. Procjena je autora da analiza za ostale tankove nije potrebna budući da se raspoloživom programskom podrškom ne može obuhvatiti utjecaj zapljuskivanja na globalni odziv broda na valovima, a kritični slučajevi po pitanju strukture tanka svakako su obuhvaćeni spomenutim pristupom. Naime, analiza za središnji tank potrebna je zato jer je on najširi pa se kod ljuljanja mogu očekivati udari značajnijeg intenziteta, dok je za pramčani tank analiza neophodna, kako zbog njegove udaljenosti od središta broda (osobito bitno kod posrtanja), tako i zbog promjene njegove širine po duljini broda. Zbog sužavanja pramčanog tanka prema pramcu, može se pri posrtanju broda javiti povećanje hidrodinamičkih opterećenja na pregradu tanka, koje se korištenim programima ne može uzeti u obzir direktno, već je potrebna korekcija izlaznih rezultata. Razine punjenja varirane su od 15% do 90%, s korakom od 15%, te je ispitana razina od 99%. Najprije su za oba tanka, pri svim odabranim razinama punjenja, izračunati prirodni periodi osliliranja fluida u poprečnoj i uzdužnoj ravnini programom „SDA Tank Assessment“, te je njihovom usporedbom s pripadnim prirodnim periodima broda utvrđena potrebna proračunska razina. Prirodni periodi broda i maksimalna gibanja kroz vijek korištenja broda izračunati su prema izrazima navedenim u 4.2. (program ih sam izračunava na temelju navedenih formula). Za razine punjenja, gdje su potrebne prva i druga proračunska razina, opterećenja su izračunata spomenutim programom i sastavni su dio izlazne liste. Program „SDA Tank Assessment“ daje, kao dio rezultata, većinu ulaznih podataka za numeričku analizu gibanja fluida programom „SDA Fluids“, za razine punjenja pri kojima je potrebna treća razina proračuna. Za takve razine punjenja program „SDA Fluids“, osim proračuna opterećenja nudi i vrlo dobru vizualizaciju toka fluida. Zbog opsežnosti izlaznih rezultata (zbog velikog broja trenutaka u kojima je moguće promatrati stanje u pojedinom tanku), iz mnoštva dijagramskih i tabličnih prikaza, izdvojeni su posebni slučajevi za koje je procijenjeno da imaju veći značaj.

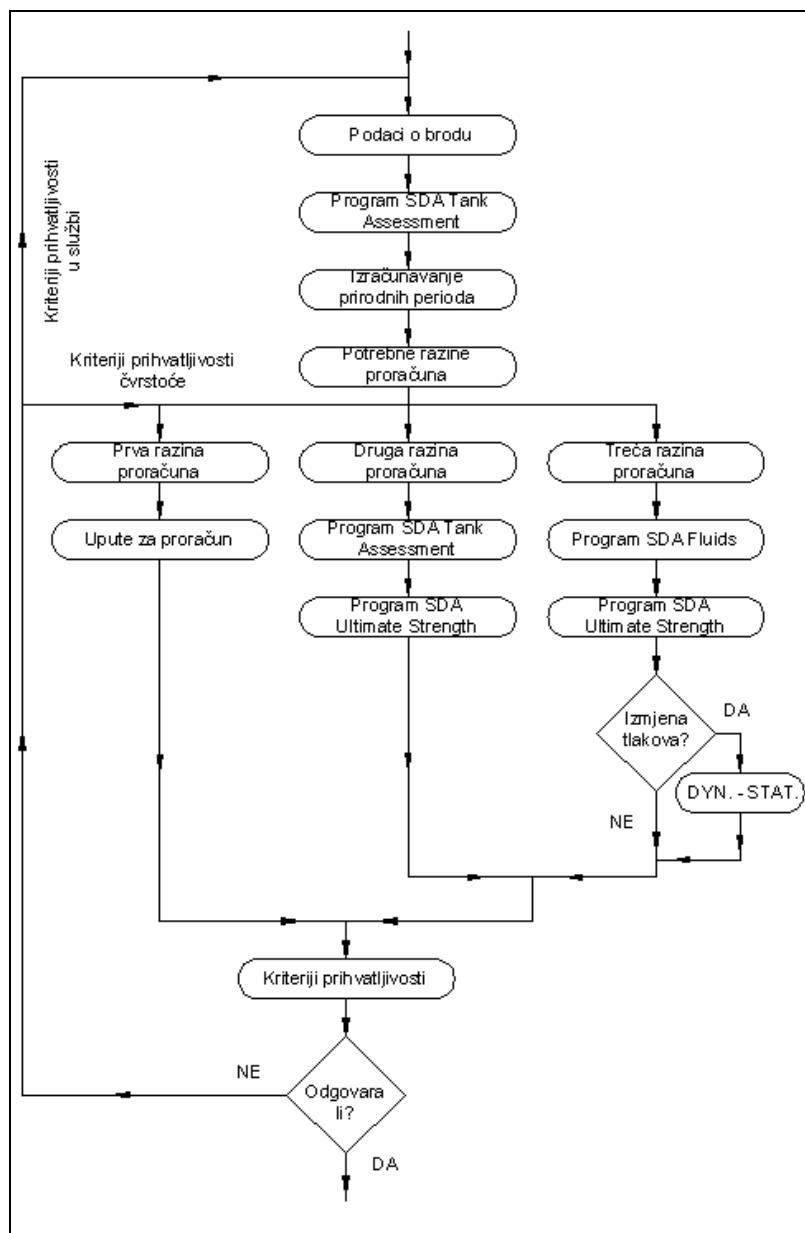
7.1. Općenito o proračunu zapljuskivanja prema SDA postupku

Unutar SDA postupka definirane su tri razine proračuna, od kojih svaka zahtijeva različit pristup pri određivanju maksimalnih tlakova uslijed zapljuskivanja.

Prva razina proračuna bazirana je na ekvivalentnim statičkim opterećenjima. Ekvivalentna statička opterećenja se određuju na temelju maksimalnih kutnih gibanja kroz vijek korištenja broda.

Druga razina koristi program „SDA Tank Assessment“ u svrhu određivanja tlakova na strukturu tankova.

Treća razina proračuna temelji se na uporabi programa „SDA Fluids“ koji numeričkom metodom (metoda je opisana u nastavku) proračunava tlakove uslijed zapljuskivanja.



Slika 7.1. Dijagram toka proračuna zapljuskivanja prema LR-u [19]

7.1.1. Prva razina proračuna

Prema [7] prva razina proračuna koristi se ukoliko se prirodni period ljuľanja broda razlikuje od prirodnog perioda oscilacija fluida u poprečnoj ravnini za više od 5 sekundi, te ukoliko je prirodni period posrtanja broda veći za više od 3 sekunde od prirodnog perioda oscilacija fluida u uzdužnoj ravnini.

Kada se utvrdi potreba primjene prve razine proračuna treba obratiti pozornost na sljedeće:

- za tankove za naftu standardnih dimenzija nisu potrebni dodatni proračuni,
- za LNG ili LPG brodove tlakovi na stjenkama tankova od zapljuskivanja trebaju se odrediti prema posebnim pravilima.

U ostalim slučajevima, ekvivalentna visina statičkog tlaka se može dobiti uz pretpostavku izloženosti tanka ljuľanju ili posrtanju do maksimalnih kutova kroz vijek korištenja broda (definirano u 4.2.) prema izrazu (7.1).

$$P = 11,75 \left(h + \frac{L_s}{2} \tan \nu \right) \quad [\text{kN/m}^2] \quad (7.1)$$

gdje je:

- h – visina stupca fluida u uspravnom položaju [m],
- L_s – efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka [m],
- ν – kut koji je jednak θ_{\max} ili ϕ_{\max} ovisno radi li se o posrtanju ili ljuljanju [°].

U prvoj razini proračuna, uzimanje translacijskih gibanja u obzir smatra se nepotrebnim.

7.1.2. Druga razina proračuna

Druga razina proračuna koristi se ukoliko prirodni periodi nemaju vrijednosti kao u prethodnoj točki i pojava udara na pokrov tanka malo je vjerojatna [7]. U ovoj razini proračuna koristi se program „SDA Tank Assessment“ koji na temelju maksimalnih kutova ljuljanja ili posrtanja kroz vijek korištenja broda određuje opterećenja. Druga razina proračuna može se koristiti i za tankove s unutarnjim orebrenjem kod niske razine punjenja, a dobiveni rezultati su na strani sigurnosti (niska razina punjenja definirana je izrazom (4.13)). Poprečne i uzdužne stjenke moraju se promatrati odvojeno;

- poprečne stjenke s obzirom na posrtanje i vertikalno ubrzanje,
- uzdužne stjenke s obzirom na ljuljanje i vertikalno ubrzanje.

Ukoliko tankovi imaju nagnute gornje ili donje stjenke, tlakovi izračunati programom „SDA Tank Assessment“ moraju se korigirati pomoću korekcijskih faktora određenih eksperimentalnim putem.

Tlak na spoju potpalubnog tanka s kosim pokrovom dna i okomite stjenke jednak je:

$$P_B = K_2 \cdot P \quad (7.2)$$

pri čemu vrijedi:

$$K_2 = \frac{\left(1 + 2,5 \frac{F}{h}\right)(1 + \cos \beta)}{3} \quad \text{za } 0 < F < 0,8h \quad (7.3)$$

Oznake u izrazima (7.2) i (7.3) predstavljaju:

- K_2 – korekcijski faktor (Slika 7.2.),
- P – tlak izračunat programom „SDA Tank Assessment“ [kN/m²],
- F – razina punjenja [m],
- h – visina stupca fluida u uspravnom položaju [m],
- β – kut određen slikom 7.2. [°].

Tlak na spoju uzvojnog tanka s nagnutim pokrovom i okomite stjenke može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$P_C = K_3 \cdot P \quad (7.4)$$

pri čemu vrijede izrazi (7.5), odnosno (7.6).

$$K_3 = 1 + \frac{4F}{L_s} \quad \text{za } 0 < F < \frac{L_s}{4} \quad (7.5)$$

$$K_3 = 1 + \frac{(H - F)}{\left(H - \frac{L_s}{4}\right)} \quad \text{za } \frac{L_s}{4} < F < H \quad (7.6)$$

Oznake u (7.5) i (7.6) predstavljaju:

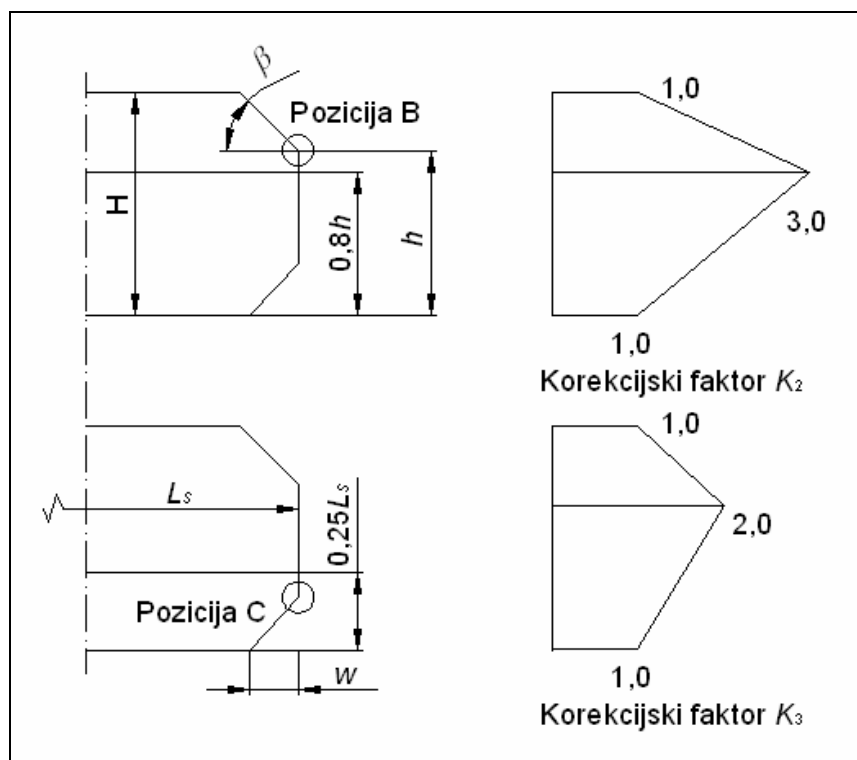
F – razina punjenja [m],

H – maksimalna visina tanka [m],

L_s – efektivna duljina slobodne površine u smjeru kutnog pomaka [m].

Napomena:

Ako je širina uzvojnog tanka w manja ili jednaka od $0,25 L_s$ korekcija nije potrebna.



Slika 7.2. Korekcijski faktori za proračun maksimalnog tlaka [19]

7.1.3. Treća razina proračuna

Treća razina proračuna primjenjuje se kada je izgledno povećanje dinamičkih tlakova na stjenkama uz udare na pokrov tanka, ili gdje je potrebno uzeti u obzir unutarnje orebrenje. U ovoj razini proračuna tlakovi uslijed zapljuskivanja se dobivaju numerički, pomoću programa „SDA Fluids“, koji se temelji na „Marker and Cell“ (MAC) metodi i koristi dvodimenzionalnu proračunsku shemu konačnih razlika (diferencija). Uzbuda mora obuhvatiti stanja koja rezultiraju maksimalnim tlakovima na stjenke tanka, pri čemu treba uzeti u obzir značajne kombinacije pomaka, amplituda, perioda gibanja broda i prirodnih perioda tekućine, koje bi se mogle pojaviti simultano kroz vijek korištenja broda.

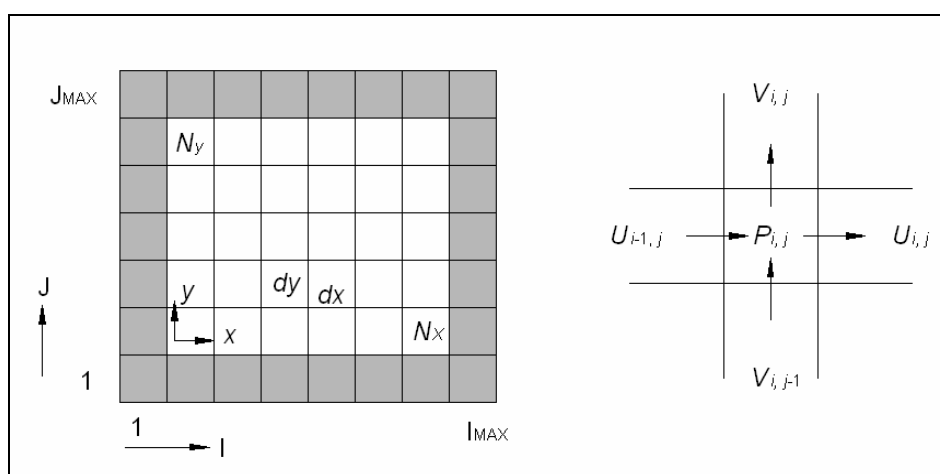
Budući da se treća razina proračuna primjenjuje gdje se javljaju značajna povećanja dinamičkih tlakova odnosno udari, a cilj analize je obuhvaćanje najgorih stanja, detaljnije su opisana neka ograničenja i pretpostavke programske podrške

koja se u njoj koristi (program „SDA Fluids“), čije je poštivanje važno kako bi se dobili što točniji rezultati.

7.2. Program „SDA Fluids“

Svaki model u programu „SDA Fluids“ idealizira se 2D mrežom pravokutnih ćelija. S mrežom su povezana tri skupa nezavisnih varijabli, i to: tlak u središtu pojedine ćelije i brzine fluida okomite na horizontalni i vertikalni rub ćelije [6], [7] i [19]. Različite metode su sadržane u logici programa, da bi se smanjila ograničenja modeliranja samo na pravokutnu mrežu, pa se pažljivim korištenjem programa ta ograničenja mogu učiniti uistinu nevažnim.

Tlakovi se računaju samo u središtu svake ćelije mreže, na što treba obratiti pozornost, ukoliko su hidrostatska opterećenja od većeg značaja.



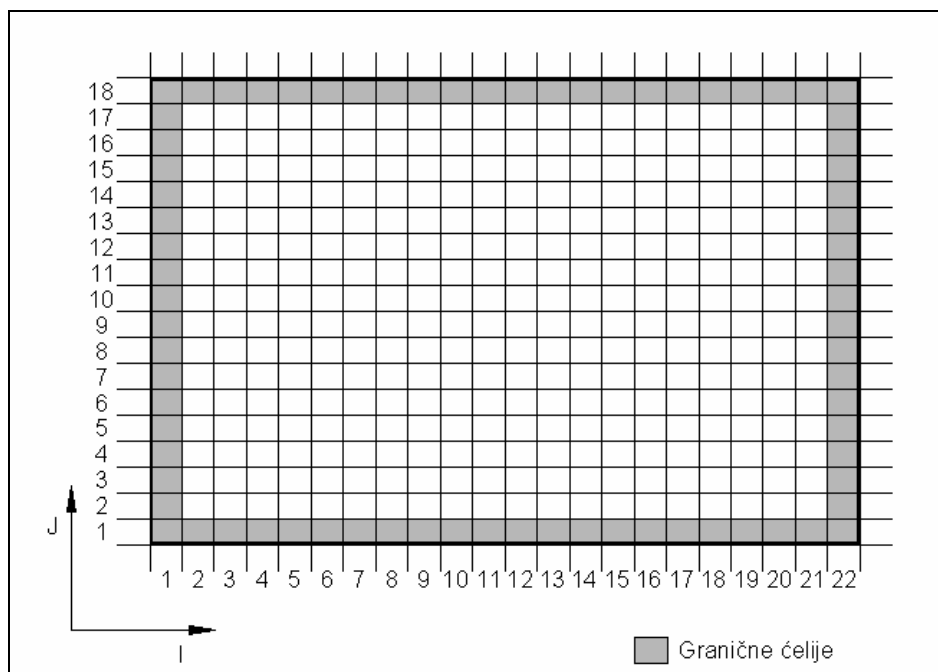
Slika 7.3. Mreža konačnih razlika i fiktivne ćelije, varijable i njihovi smjerovi [6]

Program „SDA Fluids“ ne koristi dvofazni model fluida na slobodnoj površini. Prostor u kojem nema fluida smatra se vakuumom. Slobodna površina se prikazuje kao funkcija jedne varijable, pa se ne mogu prikazati neke pojave kao što je primjerice razbijanje valova. To može uzrokovati pogreške, u slučajevima u kojima se simulira niska razina punjenja uz velike amplitude uzbude. Kada je dubina punjenja takva da je dno tanka izloženo zapljuskivanju, potrebno je pažljivo interpretirati rezultate jer se u takvim situacijama često pojavljuju nesuvisla rješenja.

Pri analizi zapljuskivanja u pravokutnom tanku postavljanje mreže vrlo je jednostavno, ali ukoliko je tank drukčijeg oblika potreban je pažljiv odabir dimenzija ćelija za ispravno modeliranje nagiba svake stjenke. Nepravilnosti se mogu modelirati samo kao stepenaste stjenke, pa je najbolja konfiguracija mreže prema obliku takva da se stjenka idealiziranog tanka podudara s modeliranom stjenkom u središtima horizontalnih rubova svake ćelije, ili da idealizirana struktura siječe horizontalne rubove ćelija [7].

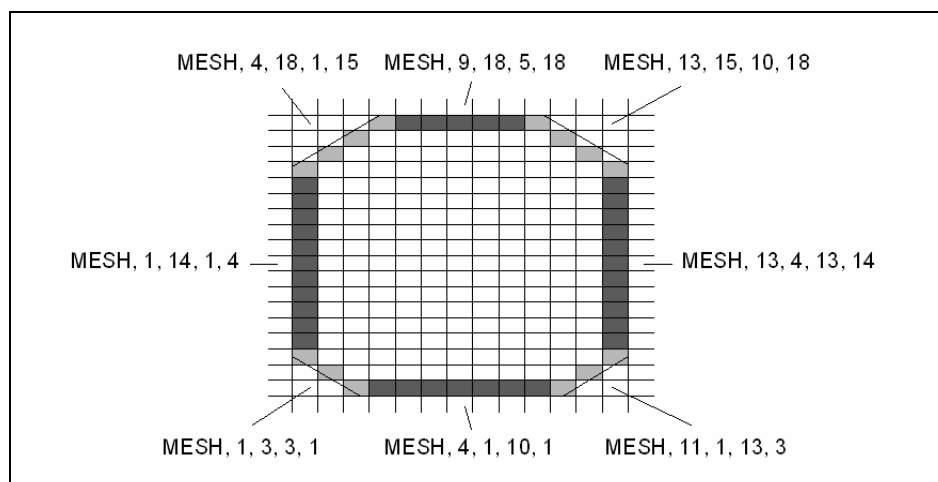
Gustoća mreže u oba smjera, u idealnom slučaju, treba biti u funkciji svih važnih dimenzija tanka u smjeru glavnih osi, a omjer stranica pojedinih ćelija trebao bi biti blizu jedinične vrijednosti [19]. Iskustvo korisnika koji modelira, kod izbora mreže, dolazi do izražaja jer je potreban kompromis između pravilnog opisa strukture (pojave) i vremena izvođenja proračuna. U većini slučajeva, dobar kompromis je postavljanje između 20 i 30 ćelija u horizontalnom i 15 do 20 ćelija u vertikalnom smjeru. Maksimalni broj ćelija koji program dopušta je 60x50. Modeliranje s većim brojem ćelija može dovesti do nepouzdanе procjene tlakova.

Odnos obrisa tanka prema mreži najlakše je procijeniti tako da se tank nacrti na papiru na kojem je iscrtana gruba mreža čije relativne dimenzije odgovaraju dimenzijama ćelija mreže za modeliranje. U prvom koraku potrebno je odrediti ćelije koje predstavljaju rubnu površinu fluida ukoliko je tank pun [19]. Takve ćelije nazivaju se aktivnim i zajedno formiraju idealizirani tank. Donja lijeva ćelija uvijek ima (I,J) koordinate (1,1), a ostale ćelije slijede vrlo jednostavnu logiku označavanja prema [19].



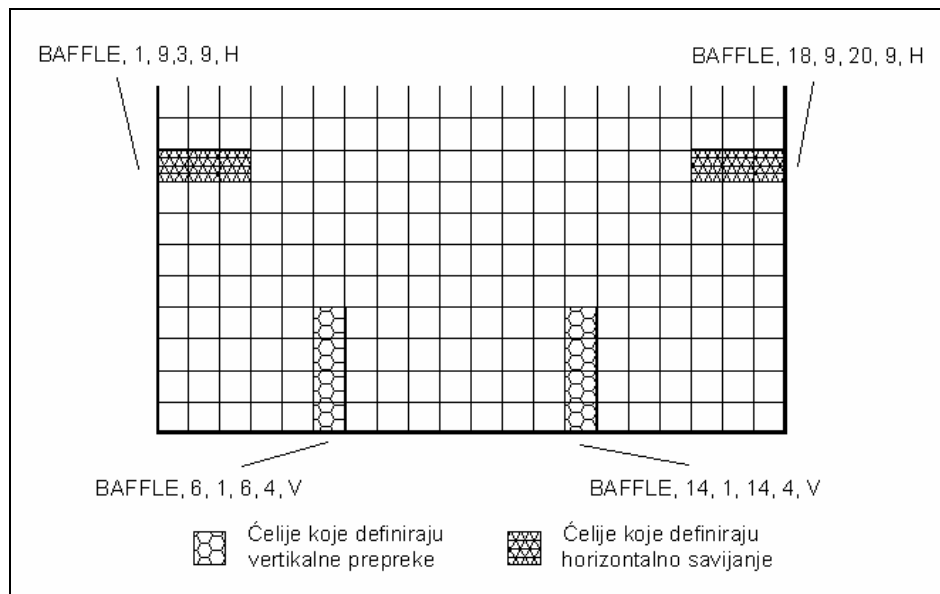
Slika 7.4. Koordinatni sustav mreže [19]

Aktivne ćelije kroz koje, ili na čijim rubovima prolaze granice tanka, nazivaju se granične ćelije. Idealizirani tank definira se određivanjem graničnih ćelija na tzv. „MESH“ podacima [7]. Svaka skupina takvih podataka definira jedan dio granice tanka. Postoje četiri odijeljena područja granica mreže; lijevo i desno, koja uključuju samo vertikalna područja ekstremnog ruba mreže, i gore i dolje, koja uključuju sve ostale dijelove. Vrsta rubnih uvjeta može se definirati za svako područje, a mora se paziti na postavljanje mreže kod nagnutih pokrova kako bi se izbjeglo preklapanje s graničnim dijelovima tanka. Granične ćelije se definiraju u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu.



Slika 7.5. Primjer definiranja rubova [19]

Struktura u tanku može se uzeti u obzir tako da se narine nulta brzina prolaska fluida kroz zamišljenu liniju, koja se nalazi na mjestu modeliranog strukturnog elementa. Inače, ukrepljenja mogu imati samo dimenzije koje odgovaraju predviđenom cijelom broju ćelija mreže.



Slika 7.6. Primjer definiranja unutarnje strukture u tanku [19]

Spektar uzbude od zapljuskivanja opisuje se pomoću sljedećih skupina podataka: PMESH, ANGL, VERT, HORI, SPEC. Ove skupine podataka generiraju sinusoidalne komponente gibanja prema sljedećoj jednadžbi:

$$A = A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (7.7)$$

Skupine podataka tipa ANGL opisuju kutni pomak tanka (konstantne amplitude) oko osi okomite na mrežu, kako se definira na PMESH podacima.

Skupine podataka tipa VERT opisuju vertikalni pomak konstantne amplitude (poniranje), podaci tipa HORI analogno tome opisuju zanošenje, dok podaci tipa SPEC opisuju posebnu formu gibanja promjenjive amplitude s periodom uzbude prema sljedećoj jednadžbi:

$$A_0 = A_{\max} e^{\frac{-(T_p - T_{pn})^2}{2Q}} \quad (7.8)$$

Amplitude, periodi i relativni fazni pomaci prisilnih gibanja su također određeni na skupini podataka gibanja, zajedno s prirastom perioda i intervalom prirasta ako se period mijenja tijekom vremena.

Za sve tipove podataka vrijede sljedeće definicije:

Početni period može se izraziti kao:

$$S'_n = S_n + 1 \quad \text{za } T_n + 1 < S_n \quad (7.9)$$

$$S'_n = S_n + 2 \quad \text{za } T_n - 1 < S_n \leq T_n + 1 \quad (7.10)$$

$$S'_n = S_n + 3 \quad \text{za } S_n \leq T_n - 1 \quad (7.11)$$

Prirast perioda jednak je: $-0,001$ s.

Interval prirasta jednak je referentnom vremenskom koraku T_r .

Za tipove podataka SPEC maksimalna amplituda definirana je u 4.2., a minimalna amplituda bi se trebala uzeti 6° za ljuljanje i 3° za posrtanje. Konstanta kvarenja Q za ljuljanje treba biti jednaka 2 a posrtanje 3.

Rezultati programa „SDA Fluids“ prikazuju se u vremenskoj domeni, a jedna od najvažnijih značajki simulacije je odabir referentnog vremenskog koraka. Vremenski korak ne smije biti premali jer se znatno povećava vrijeme trajanja proračuna, ali ni preveliki jer bi se neke važne značajke u izlaznim podacima mogle propustiti. Referentni vremenski korak koji algoritam uzima jednak je:

$$T_r = \frac{(S'_n - 2)}{200} \quad [s] \quad (7.12)$$

Trajanje simulacije je takvo da daje konačni period 4 sekunde kraći od početnog perioda, pa je prema tome ukupno vrijeme trajanja simulacije jednako:

$$T_{simul} = 4000T_r \quad [s] \quad (7.13)$$

Ukoliko je tlocrt tanka koji se želi analizirati izrazito trapeznog oblika, kao što je slučaj s pramčanim ili krmenim tankovima, ispitivanja na modelima u smanjenom mjerilu pokazuju povećanje dinamičkog tlaka kod posrtanja, na pregradi užeg kraja tanka u usporedbi s tankom pravokutnog tlocrta. Program „SDA Fluids“ ovaj aspekt ne može uzeti u obzir, a tlak na užem kraju tanka u odnosu na tlak u tanku jednolike širine može se izraziti na sljedeći način [19]:

$$P_{suženo} = K_t P_{najv. \text{ širina}} \quad (7.14)$$

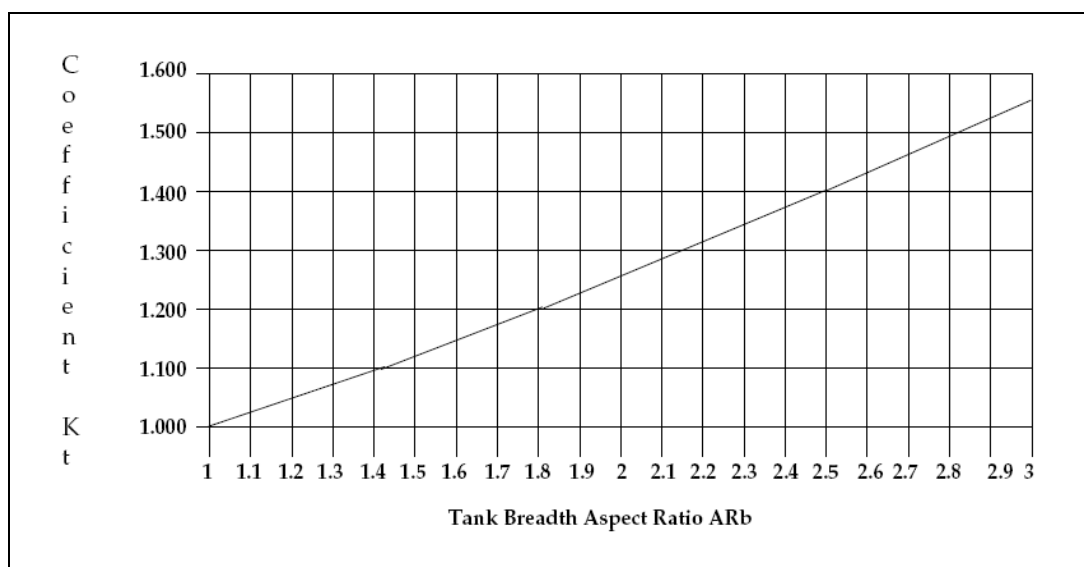
Korekcijski faktor K_t može se izračunati prema:

$$K_t = 0,8e^{0,2235 ARb} \quad (7.15)$$

pri čemu je:

ARb – omjer najveće i najmanje širine tanka.

Korekcijski faktor K_t za različite omjere najveće i najmanje širine tanka prikazan je sljedećom slikom:



Slika 7.7. Korekcijski faktor K_t za određivanje opterećenja u trapeznom tanku [19]

Podaci za crtanje gornjeg dijagrama u [19] su prikazani i tablično.

Sve fizikalne veličine, dobivene pomoću programa „SDA Fluids“ u skladu su s SI sustavom mjernih jedinica (osnovne mjerne jedinice su metar, kilogram i sekunda), pa se na prikazima rezultata naglašavaju samo eventualna odstupanja od takvog označavanja (npr. mjerna jedinica za kut je stupanj).

Za nekog tko se prvi put susreće s proračunom zapljuskivanja, zbog složene matematičke formulacije gibanja fluida, te ovisnosti izlaznih rezultata o ispravnosti modeliranja uvjeta pod kojima se zapljuskivanje odvija, pri uporabi programa „SDA Fluids“, preporučljivo je pridržavati se uputa prikazanih u [19], gdje su opisane tipične greške koje se mogu javiti, načini njihova prepoznavanja, te postupci za njihovo izbjegavanje.

7.3. Matematički model gibanja fluida i njegovo rješenje

Za postavljanje matematičkog modela i opis rješenja problema metodom konačnih razlika potrebno je početi od osnovnih definicija dinamike fluida [20]. Matematički model u općem slučaju sastoji se od skupa diferencijalnih (integro-diferencijalnih) jednačbi i konstitutivnih relacija, a koje zajedno s početnim i rubnim uvjetima čine zatvoren skup jednačbi kojim se opisuje neki fizikalni problem [21].

7.3.1. Osnove dinamike fluida

Newtonovski fluidi se mogu definirati kao oni u kojima je smično naprezanje linearno proporcionalno gradijentu brzine okomito na smjer strujanja. Za strujanje fluida u smjeru x smično naprezanje se može prikazati sljedećim izrazom [20]:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (7.16)$$

Veličina μ [Pa·s] predstavlja dinamičku viskoznost koja predstavlja mjeru otpornosti klizanju jednog sloja fluida preko drugog.

Kinematička viskoznost dana je izrazom:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7.17)$$

Zakon održanja mase kaže da u fiksnom volumenu V , omeđenom površinom S , masa fluida koja istječe kroz površinu mora biti jednaka smanjenju mase sadržane u promatranom volumenu, i može se zapisati u sljedećem obliku [20]:

$$\int \rho \vec{v} \times \vec{n} dS = - \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (7.18)$$

gdje je:

- \vec{v} – vektor brzine fluida,
- \vec{n} – jedinični vektor normale na površinu,
- ρ – gustoća fluida.

Dakako, može se pisati i općenitiji i puno jednostavniji oblik zakona očuvanja:

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \quad (7.19)$$

Površinski integral iz izraza (7.18) može se transformirati u volumenski pomoću Gaussovog teorema divergencije:

$$\int \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right] dV = 0 \quad (7.20)$$

iz čega slijedi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7.21)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \nabla \cdot \rho + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (7.22)$$

odnosno:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (7.23)$$

Izraz (7.23) poznatiji je kao jednačba kontinuiteta.

Za nestlačive fluide gustoća je konstantna pa jednačba kontinuiteta, tj. izraz (7.23) prelazi u sljedeći izraz:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (7.24)$$

odnosno u izraz (7.25):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7.25)$$

Jednačbe gibanja koje određuju dinamičko ponašanje fluida mogu se izvesti primjenjujući Newtonove zakone na čestice fluida, koje se promatraju kao infinitezimalne mase.

Drugi Newtonov zakon glasi:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (7.26)$$

Ubrzanje čestica fluida jednako je:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (7.27)$$

Za proizvoljni volumen fluida, ukupna sila koja djeluje na masu unutar tog volumena određena je drugim Newtonovim zakonom i dana je sljedećom integralnom jednačbom:

$$\int \left(\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} - \rho \vec{f} + \nabla p \right) dV = 0 \quad (7.28)$$

odnosno:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \quad (7.29)$$

Izraz (7.29) predstavlja opći oblik Eulerove jednačbe. Budući da je zanemarena viskoznost Eulerova jednačba vrijedi samo za idealne fluide. Spomenutu jednačbu moguće je zapisati za 3D kartezijeve (Descartesove) koordinate, izraz (7.30).

$$\begin{aligned}
\frac{Du}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \\
\frac{Dv}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \\
\frac{Dw}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z
\end{aligned} \tag{7.30}$$

Budući da gustoća nije pretpostavljena konstantnom, prethodne jednadžbe vrijede, kako za stlačive, tako i za nestlačive fluide.

Da bi se izvele Navier–Stokesove jednadžbe za viskozne fluide, potrebno je umjesto tlaka p koristiti tenzor naprezanja $\{\sigma\}$ definiran izrazom:

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{7.31}$$

Uzimajući u obzir izraz (7.31) integralna jednadžba drugog Newtonova zakona, izraz (7.28) se može pisati na sljedeći način:

$$\int \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} dV = \int \rho \vec{f} dV + \int \sigma^T \vec{n} dS \tag{7.32}$$

što daje:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho \vec{f} \tag{7.33}$$

Za 3D kartezijeve koordinate izraz (7.33) glasi:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Du}{Dt} &= \rho f_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\
\rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho f_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\
\rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho f_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{7.34}$$

Komponente tenzora naprezanja definirane su sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= -p - \frac{2\mu D}{3} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\
\sigma_{yy} &= -p - \frac{2\mu D}{3} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\
\sigma_{zz} &= -p - \frac{2\mu D}{3} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\
\tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
\tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{7.35}$$

Prosječan tlak iz izraza definiran je kao:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (7.36)$$

Veličina D iz izraza (7.35) jednaka je:

$$D = \nabla \cdot \vec{v} \quad (7.37)$$

Uvrštavajući gornje jednadžbe u jednadžbe gibanja dobiju se poznate Navier–Stokesove jednadžbe:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu D)}{\partial x} + \frac{2\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu D)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{2\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu D)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{2\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (7.38)$$

Za nestlačivi fluid konstantne viskoznosti jednadžbe iz izraza (7.38) se mogu zapisati jednostavnije:

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \end{aligned} \quad (7.39)$$

odnosno u vektorskoj notaciji:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (7.40)$$

Uspoređujući izraze (7.29) i (7.40) može se reći da su Navier–Stokesove jednadžbe zapravo Eulerove jednadžbe u kojima je dodan tzv. viskozni član.

7.3.2. Rješenje matematičkog modela numeričkom metodom

Matematički model potrebno je rješavati numeričkom metodom, zato što su analitička rješenja općeg matematičkog modela moguća samo za najjednostavnije slučajeve. Konceptom diskretizacije i numeričkih metoda postiže se približno (dovoljno točno) rješenje [21].

Koristi se mreža konačnih razlika, koja se sastoji od N_x odnosno N_y ćelija u smjerovima prema Slici 7.3. Širina ćelije jednaka je δ_x a visina ćelije δ_y (na Slici 7.3. oznake za dimenzije ćelija su dx , odnosno dy). Područje protezanja fluida uvijek je okruženo s dodatnim fiktivnim ćelijama, pa vrijedi:

$$\begin{aligned} I_{MAX} &= N_x + 2 \\ J_{MAX} &= N_y + 2 \end{aligned} \quad (7.41)$$

Ovdje je zgodno navesti da je metoda konačnih razlika najstarija numerička metoda rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (engl. PDE), te potječe iz 18. stoljeća [21].

Već je u 7.2. napisano da su tražene varijable tlak u središtu ćelije, te horizontalne i vertikalne brzine na rubovima ćelije, kako prikazuje Slika 7.3.

Navier-Stokesova jednadžba koja se koristi za numeričko rješenje, je jednadžba (7.40), a može se zapisati i na sljedeći način [20]:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla\varphi + \nu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (7.42)$$

pri čemu je omjer p/ρ zamijenjen s φ .

Lijevu stranu jednadžbe (engl. LHS – neformalna kratica koju često rabe matematičari) prikladno je pisati samo kao vremensku derivaciju pomoću izraza:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \times \nabla)\vec{v} \quad (7.43)$$

Na taj način izraz (7.42) poprima oblik:

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \times \nabla)\vec{v} - \nabla\varphi + \nu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (7.44)$$

Izraz (7.44) sadrži tzv. akceleracijske članove, odnosno promjenu inercije. Član $-(\vec{v} \times \nabla)\vec{v}$ opisuje tzv. prijenos količine gibanja uslijed gibanja fluida, član $-\nabla p$ predstavlja promjenu količine gibanja uslijed okomitih sila tlaka, član $-\nu\nabla^2\vec{v}$ predstavlja rasipanje količine gibanja uslijed procesa pod utjecajem viskoznosti, te na poslijetku član \vec{f} opisuje produkciju količine gibanja uslijed vanjske sile.

Zbog slaganja mreže konačnih razlika transportni član u jednadžbi (7.44) treba se modificirati zato što se u obliku u kojem je naveden ne može izraziti u vidu tzv. čistih razlika. Za 2D kartezijeve koordinate transportni član se može izraziti kao:

$$\begin{aligned} (\vec{v} \times \nabla)u &= u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + u\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ &= 2u\frac{\partial u}{\partial x} + \left(u\frac{\partial v}{\partial y} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ &= \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \end{aligned} \quad (7.45)$$

gdje vrijedi (za nestlačive fluide):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = D = 0 \quad (7.46)$$

Modificirana Navier–Stokesova jednadžba sada se može napisati u obliku:

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} = -\nabla \times (\vec{v}\vec{v}^T) - \nabla p + \nu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (7.47)$$

gdje je:

$$\vec{v}\vec{v}^T = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u & v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u^2 & uv \\ uv & v^2 \end{pmatrix} \quad (7.48)$$

Navier–Stokesove jednadžbe za 2D kartezijeve koordinate sada poprimaju oblik:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial u^2}{\partial x} - \frac{\partial uv}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial v^2}{\partial y} - \frac{\partial uv}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y\end{aligned}\quad (7.49)$$

U sljedećim jednadžbama eksponenti se koriste za označavanje vremenskog trenutka u pojedinim koracima δt tako da je vrijeme jednako $t = n\delta t$, dok se indeksi koriste za označavanje lokacije, odnosno koordinata ćelije. Gdje su eksponenti izostavljeni, pretpostavlja se vremenski trenutak $n\delta t$.

Za horizontalnu brzinu u može se pisati:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\delta t} (u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n) \quad (7.50)$$

Diferencijska jednadžba koja aproksimira jednadžbu kontinuiteta za ćeliju (i,j) glasi:

$$\frac{1}{\delta_x} (u_{i,j}^{n+1} - u_{i-1,j}^{n+1}) + \frac{1}{\delta_y} (v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j-1}^{n+1}) = 0 \quad (7.51)$$

Diferencijske jednadžbe koje aproksimiraju Navier–Stokesove jednadžbe glase:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \delta t \left[\frac{1}{\delta_x} (\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i+1,j}^n) + f_x - FUX - FUY + VISX \right] \quad (7.52)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^n + \delta t \left[\frac{1}{\delta_y} (\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i,j+1}^n) + f_y - FVX - FVY + VISY \right] \quad (7.53)$$

Konvektivne komponente strujanja definirane su sljedećim jednadžbama:

$$\begin{aligned}FUX &= \frac{\left[(u_{i,j} + u_{i+1,j})^2 + \alpha |u_{i,j} + u_{i+1,j}| (u_{i,j} - u_{i+1,j}) \right]}{4\delta_x} \\ &\quad - \frac{\left[(u_{i-1,j} + u_{i,j})^2 + \alpha |u_{i-1,j} + u_{i,j}| (u_{i-1,j} - u_{i,j}) \right]}{4\delta_x}\end{aligned}\quad (7.54)$$

$$\begin{aligned}FUY &= \frac{\left[(v_{i,j} + v_{i+1,j}) (u_{i,j} + u_{i,j+1}) + \alpha |v_{i,j} + v_{i+1,j}| (u_{i,j} - u_{i,j+1}) \right]}{4\delta_y} \\ &\quad - \frac{\left[(v_{i,j-1} + v_{i+1,j-1}) (u_{i,j-1} + u_{i,j}) + \alpha |v_{i,j-1} + v_{i+1,j-1}| (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \right]}{4\delta_y}\end{aligned}\quad (7.55)$$

$$\begin{aligned}FVX &= \frac{\left[(u_{i,j} + u_{i,j+1}) (v_{i,j} + v_{i+1,j}) + \alpha |u_{i,j} + u_{i,j+1}| (v_{i,j} - v_{i+1,j}) \right]}{4\delta_x} \\ &\quad - \frac{\left[(u_{i-1,j} + u_{i-1,j+1}) (v_{i-1,j} + v_{i,j}) + \alpha |u_{i-1,j} + u_{i-1,j+1}| (v_{i-1,j} - v_{i,j}) \right]}{4\delta_x}\end{aligned}\quad (7.56)$$

$$FVY = \frac{\left[\left(v_{i,j} + v_{i,j+1} \right)^2 + \alpha \left| v_{i,j} + v_{i,j+1} \right| \left(v_{i,j} - v_{i,j+1} \right) \right]}{4\delta_y} - \frac{\left[\left(v_{i,j-1} + v_{i,j} \right)^2 + \alpha \left| v_{i,j-1} + v_{i,j} \right| \left(v_{i,j-1} - v_{i,j} \right) \right]}{4\delta_y} \quad (7.57)$$

U izrazima za konvektivne komponente strujanja dodani su posebni članovi pomnoženi s faktorom α , koji su potrebni zato što su jednadžbe za konačne razlike, izvedene iz diferencijalnih jednadžbi numerički nestabilne, ako nije prisutan barem maleni iznos viskoznosti.

Napomena:

Program „SDA Fluids“ uzima da je iznos faktora α otprilike jednak 0,7.

Viskozne komponente strujanja definirane su sljedećim izrazima:

$$VISX = \nu \left[\frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\delta_x^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\delta_y^2} \right] \quad (7.58)$$

$$VISY = \nu \left[\frac{v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j}}{\delta_x^2} + \frac{v_{i,j+1} - 2v_{i,j} + v_{i,j-1}}{\delta_y^2} \right] \quad (7.59)$$

Nakon što su obrađene diferencijske jednadžbe za izračunavanje brzina, sljedeći korak je svođenje tlaka na sredinu ćelije. Budući da izračunate brzine, u općem slučaju, ne zadovoljavaju jednadžbu kontinuiteta, tlakovi u ćelijama se usklađuju na način da svaka ćelija ima nultu divergenciju. Ukoliko se razmatra promjena tlaka $\delta\varphi$ za određenu ćeliju, i uzimajući u obzir diferencijske Navier–Stokesove jednadžbe (7.52) i (7.53), te ukoliko se pretpostavi da se tlakovi (i ostale veličine) u ostalim ćelijama ne mijenjaju, nove brzine uslijed male promjene tlaka postaju:

$$\begin{aligned} u_{i,j} &\rightarrow u_{i,j} + \delta\varphi \frac{\delta t}{\delta_x} \\ u_{i-1,j} &\rightarrow u_{i-1,j} - \delta\varphi \frac{\delta t}{\delta_x} \\ v_{i,j} &\rightarrow v_{i,j} + \delta\varphi \frac{\delta t}{\delta_y} \\ u_{i,j-1} &\rightarrow u_{i,j-1} - \delta\varphi \frac{\delta t}{\delta_y} \end{aligned} \quad (7.60)$$

Tražena promjena dobije se tako da se brzine iz izraza (7.60) uvrste u jednadžbu kontinuiteta, pa slijedi:

$$\delta\varphi = \frac{-D}{\left[2\delta t \left(\frac{1}{\delta_x^2} + \frac{1}{\delta_y^2} \right) \right]} \quad (7.61)$$

Budući da promjena tlaka u jednoj ćeliji uzrokuje divergenciju u ćelijama koje ju okružuju, izračunavanje tlaka je iterativan postupak, te konvergira prilično sporo. Da

bi se ubrzala konvergencija iteracije, uvodi se faktor koji služi za „promišljeno“ prilagođavanje tlaka, dovodeći divergenciju na nulu.

$$\delta\varphi \rightarrow \omega\delta\varphi \quad (7.62)$$

$$\delta\varphi = -\beta D \quad (7.63)$$

$$\beta = \frac{\omega}{\left[2\delta t \left(\frac{1}{\delta_x^2} + \frac{1}{\delta_y^2} \right) \right]} \quad (7.64)$$

Sljedeći uvjet koristi se za provjeru konvergiranja iteracije:

$$\left| \frac{D}{D_0} \right| < \varepsilon \quad (7.65)$$

pri čemu D_0 predstavlja referentnu vrijednost divergencije, a ε je za algoritam koji koristi program „SDA Fluids“ reda veličine 10^{-3} .

Algoritam po kojem radi program „SDA Fluids“ sadrži i tzv. kontrolu mase, kako bi se osiguralo da uslijed numeričke greške fluid ne nestane ili se stvori sam od sebe (vidi 3.1.2.). Za program „SDA Fluids“ uvjet da je $\varepsilon = 10^{-3}$ znači prilično veliki broj iteracija (često više od 100) prije nego se postigne konvergencija, pa se često uzima da je $\varepsilon = 10^{-2}$, čime se znatno povećavaju performanse. Druga značajka iteracije je da je konvergencija najsporija kada se fluid sporo giba, odnosno na početku simulacije. U programu „SDA Fluids“ postoji i tzv. brzo-konvergirajući algoritam, čiji opis je ovdje izostavljen.

Tlak u ćelijama kroz koje prolazi slobodna površina treba se računati odvojeno, i to je najbolje učiniti koristeći rubne uvjete za tlak. Naime, tlak na slobodnoj površini mora biti jednak tlaku u praznom dijelu tanka, tj. jednak je nuli. Tlak na slobodnoj površini može se odrediti linearnom interpolacijom uzimajući u obzir tlak u ćeliji na površini i tlak u ćeliji odmah ispod nje;

$$\frac{P_j - P_s}{h - 0,5} = \frac{P_{j-1} - P_s}{h + 0,5} \quad (7.66)$$

gdje je:

P_j – traženi tlak u ćeliji kroz koju prolazi slobodna površina,

P_s – tlak na slobodnoj površini.

Izjednačavanjem tlaka na površini s nulom dobiva se:

$$P_j = P_{j-1} \frac{h - 0,5}{h + 0,5} \quad (7.67)$$

Konfiguracija slobodno površine određuje se za svaki simulacijski ciklus nakon što se postigne konvergencija iteracije tlaka. Kinematička jednadžba za visinu slobodne površine H glasi:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = v \quad (7.68)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = v - \frac{u \partial H}{\partial x} \quad (7.69)$$

Odgovarajuća diferencijska jednadžba glasi:

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i}{\delta t} = v_s - \frac{u_s (H_{i+1} - H_{i-1})}{2\delta_x} \quad (7.70)$$

$$H_i^{n+1} = H_i + \delta t \left[v_s - \frac{1}{4\delta_x} (u_{i,jt} + u_{i-1,jt}) (H_{i+1} - H_{i-1}) \right] \quad (7.71)$$

Horizontalna brzina u_s slobodne površine je zapravo odgovarajuća brzina površinske ćelije, dok se vertikalna brzina v_s slobodne površine određuje interpolacijom, kako je opisano u [20]. Nakon interpolacije i uvođenja još nekih faktora može se pisati konačni oblik izraza za visinu slobodne površine (izraz iz [20] je malo modificiran radi preglednosti):

$$H_i^{n+1} = H_i + \delta t \left\{ \frac{-1}{4\delta_x} (u_{i,jt} + u_{i-1,jt}) (H_{i+1} - H_{i-1}) \right\} - \delta t \left\{ \gamma |u_{i,jt} + u_{i-1,jt}| (H_{i+1} - 2H_i + H_{i-1}) - kv_{i,jt} - (1-k)v_{i,jt-1} \right\} \quad (7.72)$$

Izračunavanje udarnog tlaka, odnosno njegove vremenske distribucije (određivanje impulsa) bi se moglo nazvati najvažnijom primjenom bilo kojeg programa za analizu zapljuskivanja. Za ćeliju čije su dimenzije δ_x i δ_y tlak se može izračunati prema izrazu (7.61). U vremenskom trenutku prije udara divergencija ćelije D je jednaka nuli, a u trenutku udara dana je sljedećim izrazom [20]:

$$D = -\frac{V}{\delta_y} \quad (7.73)$$

Promjena tlaka u ćeliji jednaka je:

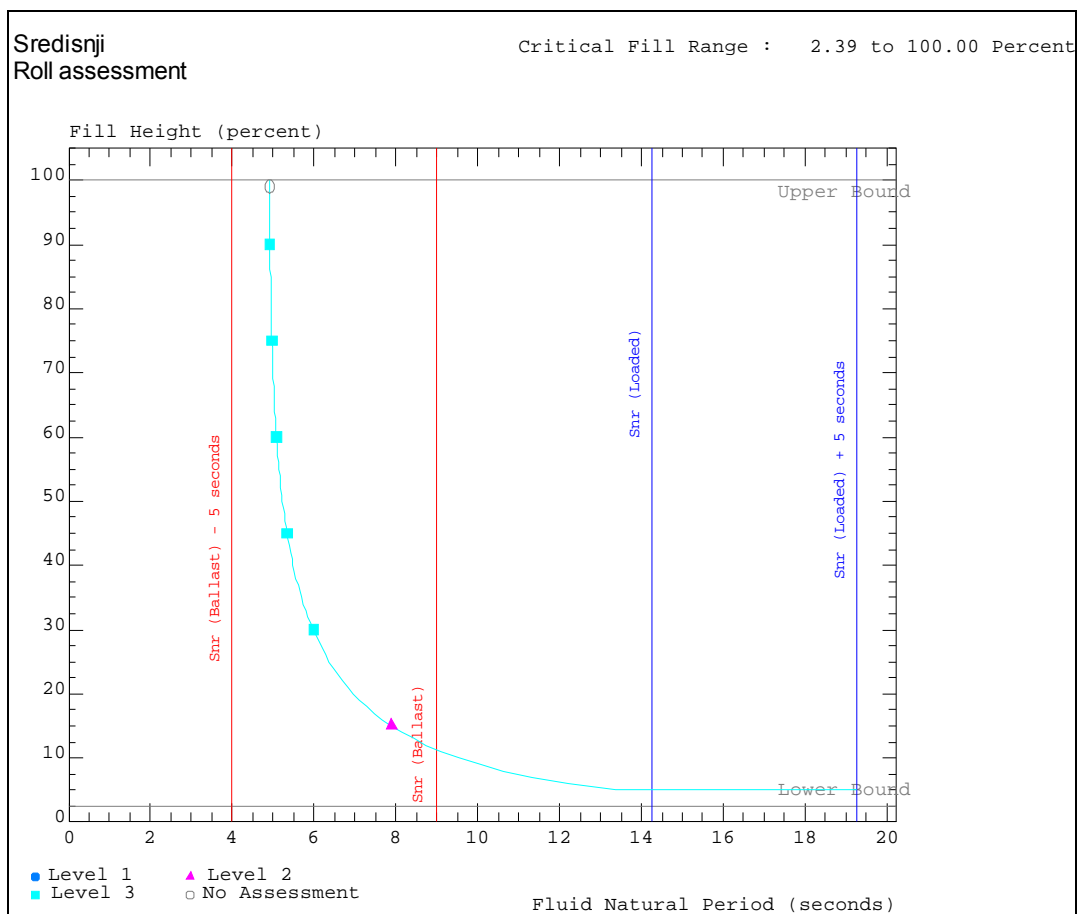
$$\delta p = \frac{\rho V}{2\delta t \delta_y \left(\frac{1}{\delta_x^2} + \frac{1}{\delta_y^2} \right)} = \frac{kv}{\delta t} \quad (7.74)$$

Budući da je tlak u ćeliji prije udara praktički jednak nuli, udarni tlak je zapravo promjena u tlaku prikazana izrazom (7.74). Vidljivo je da je tlak proporcionalan brzini i obrnuto proporcionalan vremenskom intervalu. Evidentno je da bi za dvostruko kraće trajanje udara tlak bio dvostruko veći (i obrnuto), pa je jasno da se njegov maksimalan iznos ne može točno odrediti, ali impuls je određen prilično točno budući da površina ispod krivulje, koja impuls određuje, ostaje nepromijenjena.

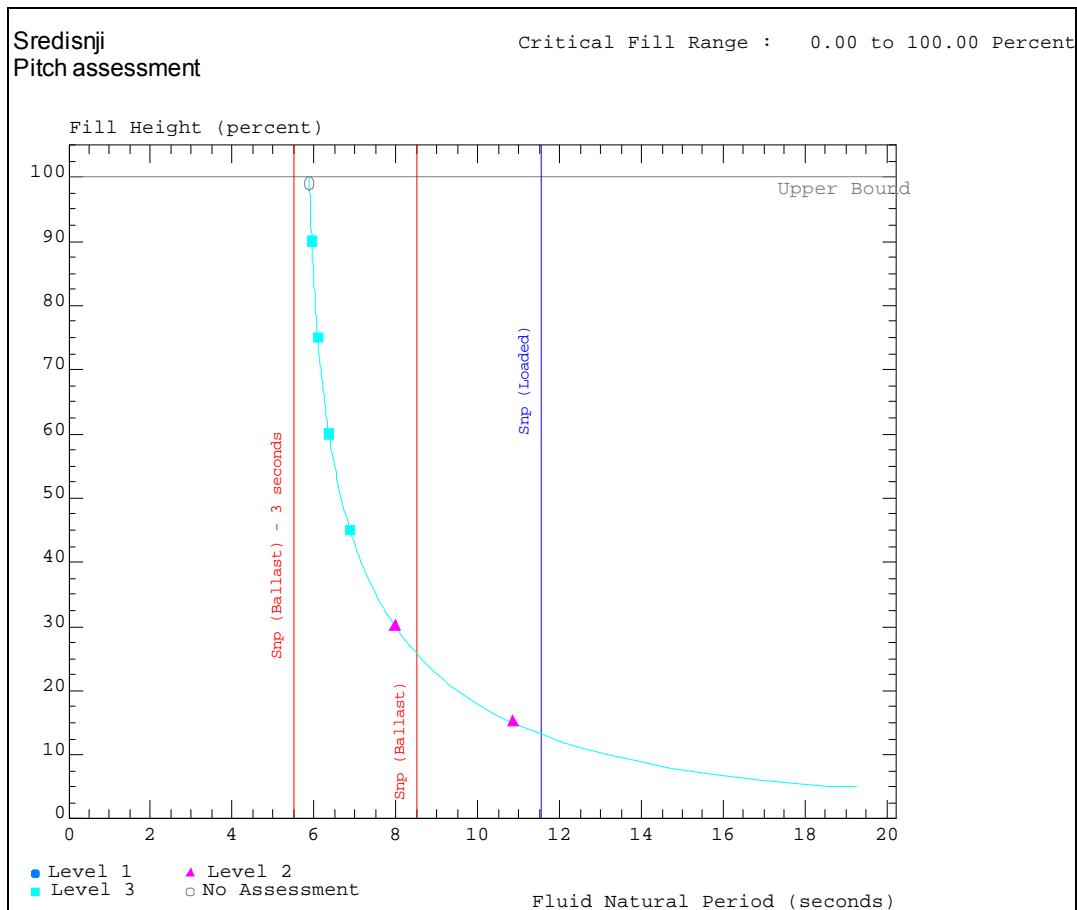
7.4. Određivanje potrebnih razina proračuna – prirodni periodi

Potrebne razine proračuna i prirodni periodi fluida za središnji i pramčani tank, te prirodni periodi broda određeni su pomoću programa „SDA Tank Assessment“, kako je spomenuto na početku ovog poglavlja. Ulazne i izlazne liste spomenutog programa prikazane su u Prilogu B. Nazivi datoteka potrebnih za numeričku analizu zapljuskivanja također su navedeni na izlaznim listama.

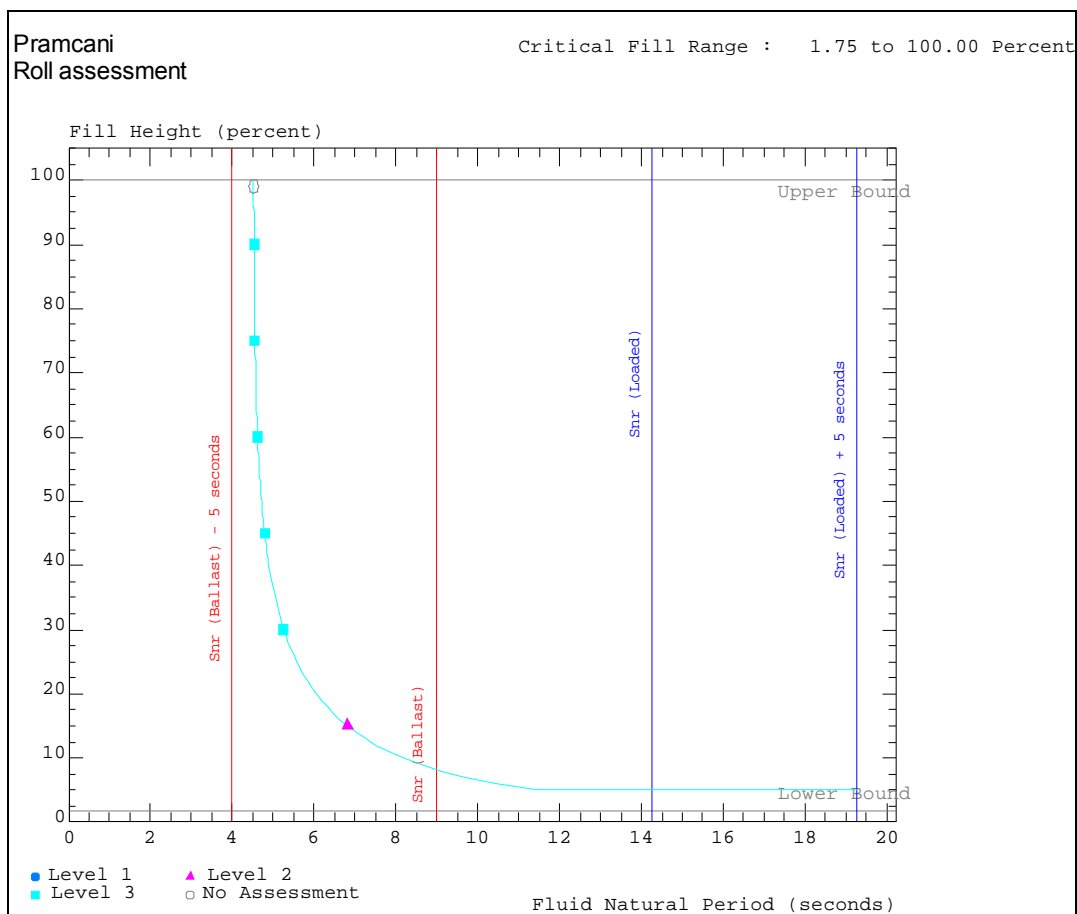
Na slikama u nastavku prikazane su potrebne razine proračuna i prirodni periodi za različite razine punjenja, uslijed ljuljanja i posrtanja broda.



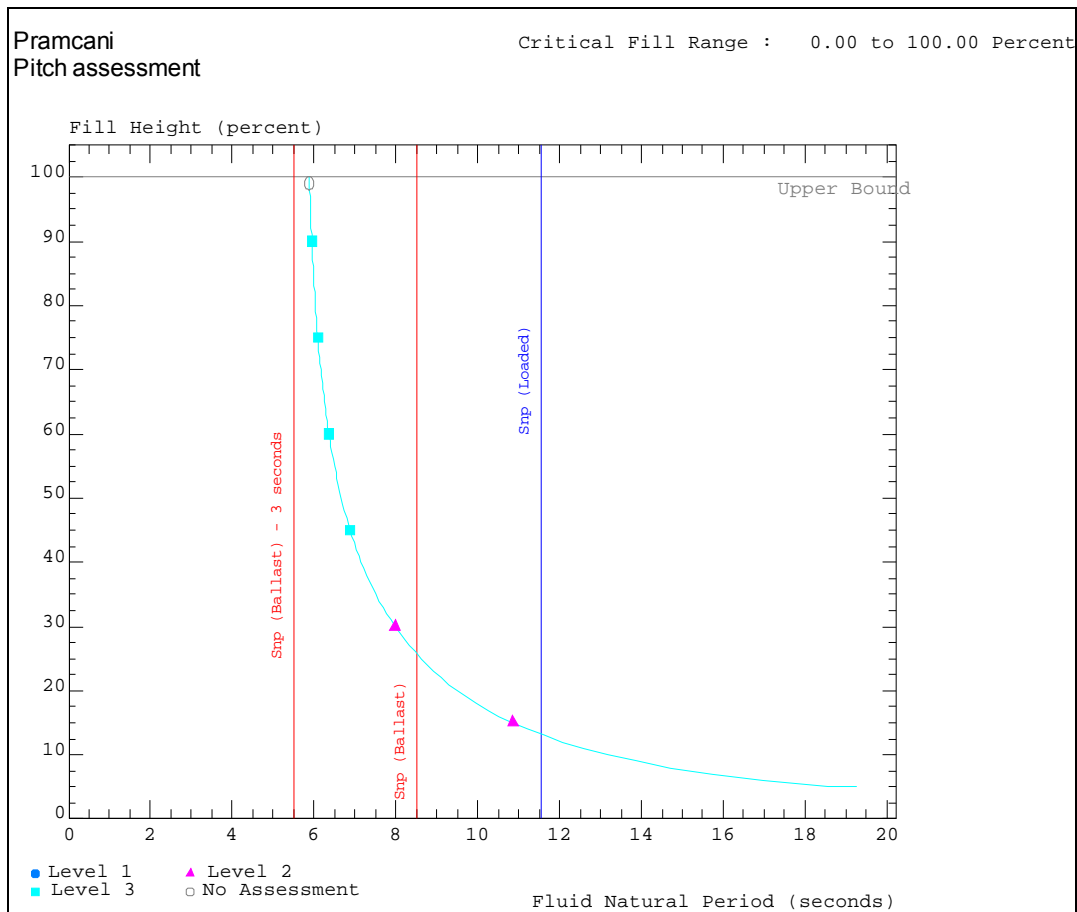
Slika 7.8. Razine proračuna i prirodni periodi za središnji tank – ljuljanje



Slika 7.9. Razine proračuna i prirodni periodi za središnji tank – posrtanje



Slika 7.10. Razine proračuna i prirodni periodi za pramčani tank – ljuljanje



Slika 7.11. Razine proračuna i prirodni periodi za pramčani tank – posrtanje

7.5. Definiranje mreže za numerički proračun (idealizirani tank)

Na prethodnim slikama može se uočiti, da je za analizu zapljuskivanja u središnjem i pramčanom tanku broda STENA PARIS, uslijed ljuljanja i posrtanja, za određene razine punjenja potrebna treća razina proračuna, odnosno provedba numeričke analize. Za numerički proračun nužno je definirati mrežu, kao i konture tanka, odnosno pripadne rubne uvjete.

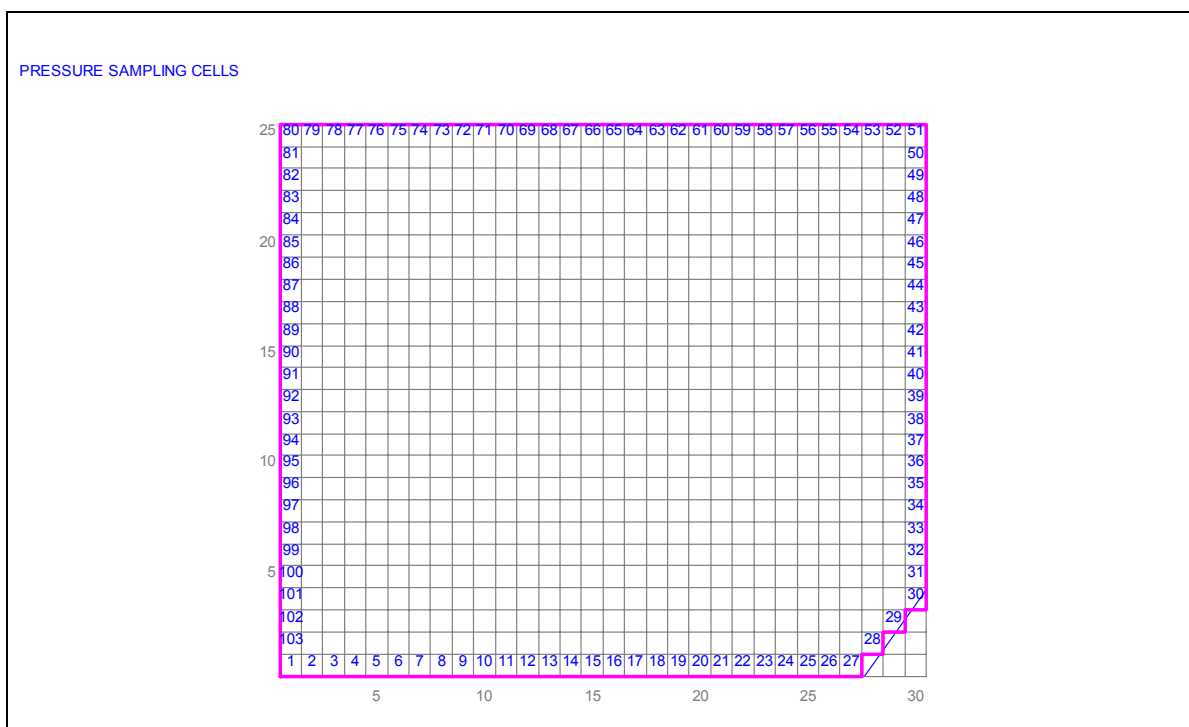
Imajući u vidu dimenzije analiziranih tankova (samo duljinu i visinu, ili samo širinu i visinu zbog 2D proračuna – Tablica 6.2.), te upute za provedbu proračuna prikazane u [19], odabrane su mreže za pojedine tankove. Za središnji i pramčani tank u uzdužnoj ravnini odabrana je ista mreža.

Tablica 7.1. Značajke mreža za numerički proračun

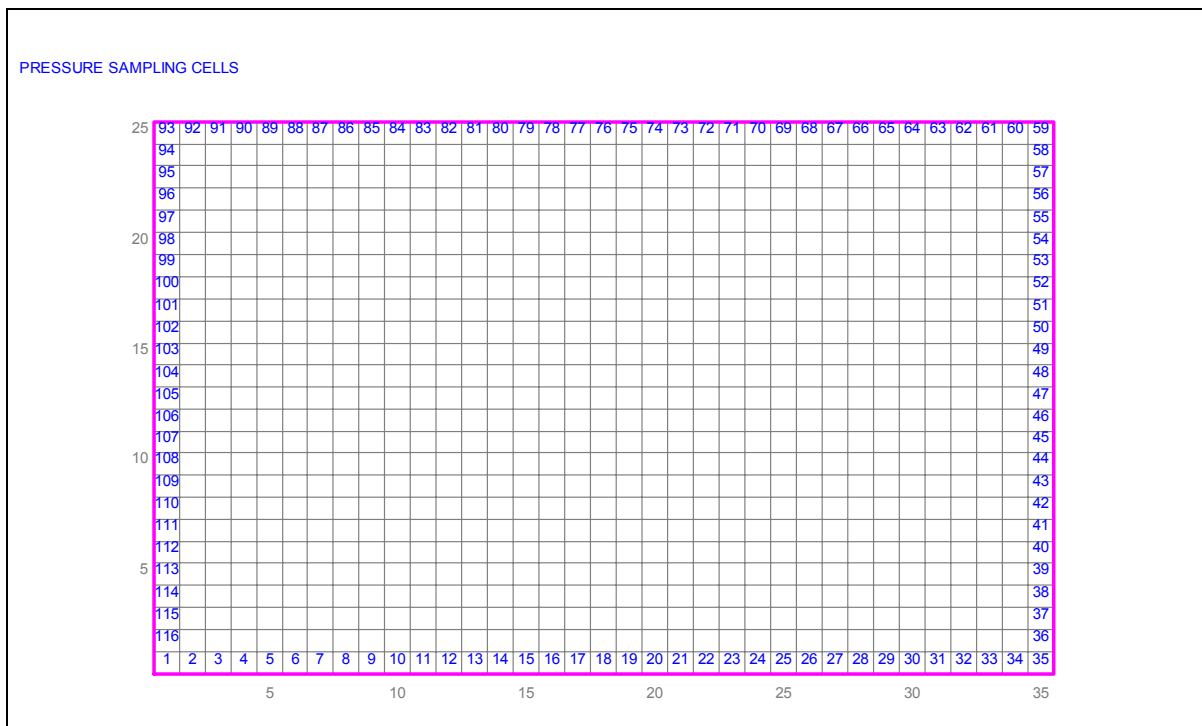
Mreža	Broj ćelija u smjeru I	Broj ćelija u smjeru J	Razmak ćelija u smjeru I	Razmak ćelija u smjeru J
			[m]	[m]
Središnji tank, poprečna ravnina	30	25	0,620	0,636
Središnji tank, uzdužna ravnina	35	25	0,740	0,636
Pramčani tank, poprečna ravnina	30	25	0,530	0,636
Pramčani tank, uzdužna ravnina	35	25	0,740	0,636

Napomena:

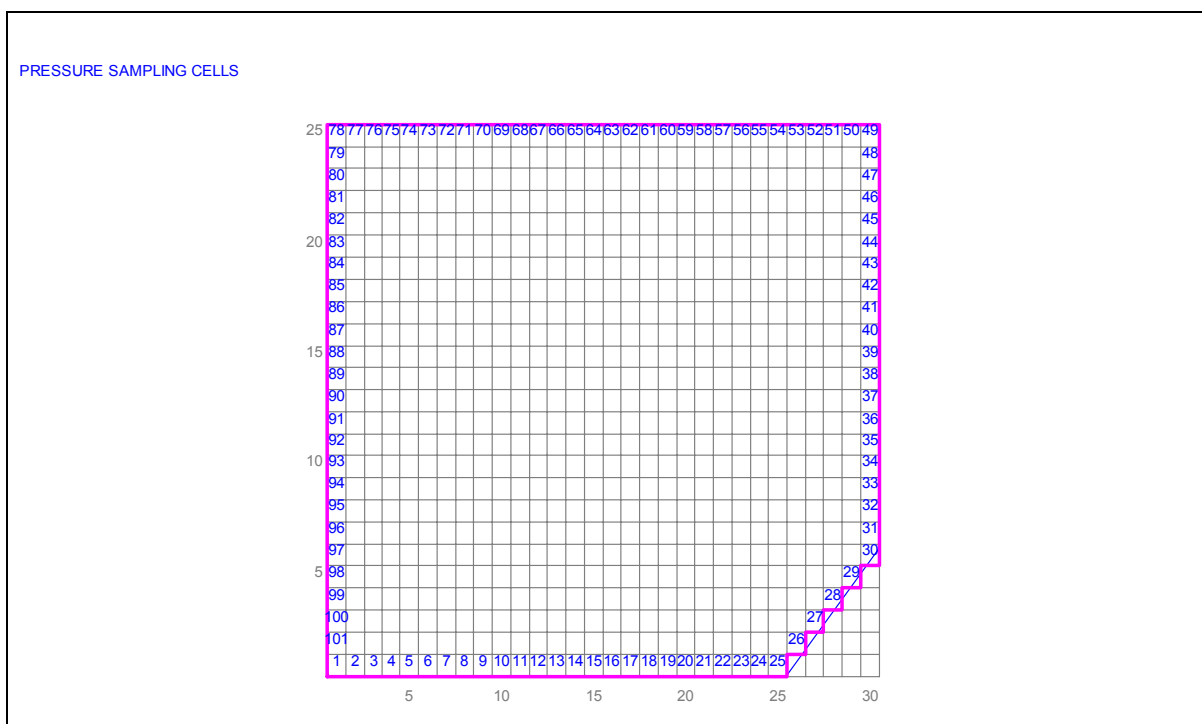
Koordinatni sustav postavljen je u skladu sa Slikom 7.4.



Slika 7.12. Mreža za središnji tank – poprečna ravnina



Slika 7.13. Mreža za središnji i pramčani tank– uzdužna ravnina



Slika 7.14. Mreža za pramčani tank – poprečna ravnina

7.6. Rezultati proračuna zapljuskivanja za središnji tank

7.6.1. Zapljuskivanje uslijed ljuljanja broda

Slika 7.8. pokazuje da se pri proračunu zapljuskivanja za središnji tank uslijed ljuljanja broda, ni za jednu razinu punjenja ne može primijeniti prva razina proračuna. Također je vidljivo da je za razinu punjenja od 15% potrebna (dovoljna) druga razina proračuna. Treća razina proračuna potrebna je za sve ostale razine punjenja (osim 99%).

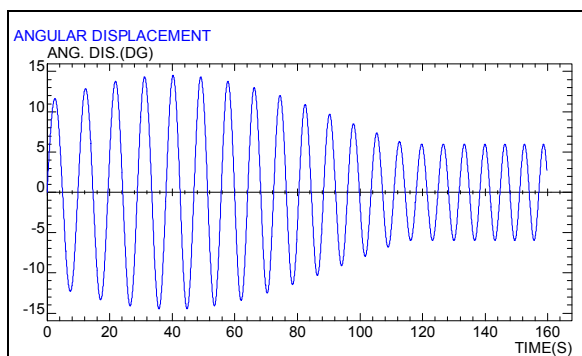
REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI DRUGOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

Tablica 7.2. Opterećenja za središnji tank uslijed ljuljanja – punjenje od 15%

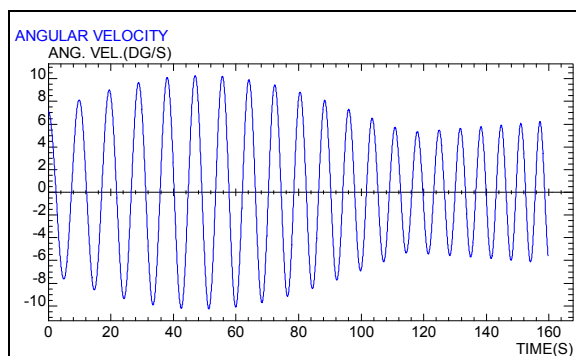
Razina punjenja [%]	Dubina fluida [m]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]
		15%
95	15,1	0,0
90	14,3	0,0
85	13,5	0,0
80	12,7	0,0
75	11,9	0,0
70	11,1	0,0
65	10,3	0,0
60	9,5	0,0
55	8,7	169,3
50	7,9	179,5
45	7,2	189,7
40	6,4	200,0
35	5,6	210,2
30	4,8	220,4
25	4,0	230,6
20	3,2	240,8
15	2,4	251,1
10	1,6	261,3
5	0,8	271,5

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI TREĆOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

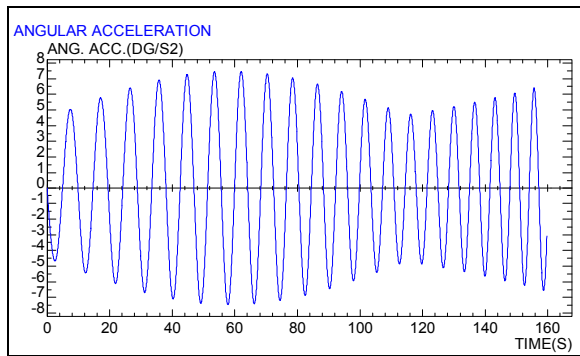
Prikazivanje svih rezultata za sve razine punjenja zauzimalo bi previše prostora, pa su prikazani važniji rezultati za razinu punjenja od 60% (ovojnica tlaka zbog važnosti je prikazana za sve razine). Svi ostali rezultati mogu se dobiti pomoću ulaznih lista, koje su za sve razine punjenja, prikazane u Prilogu C.



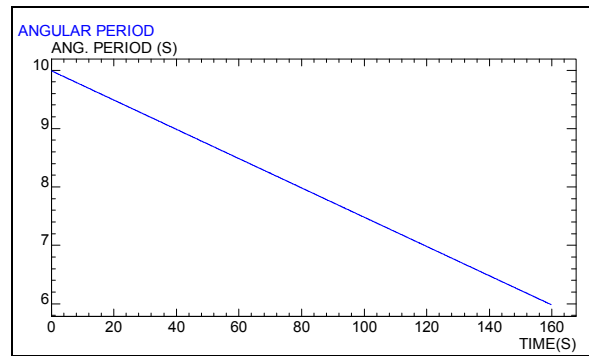
Slika 7.15. Kutni pomak broda – ljuljanje



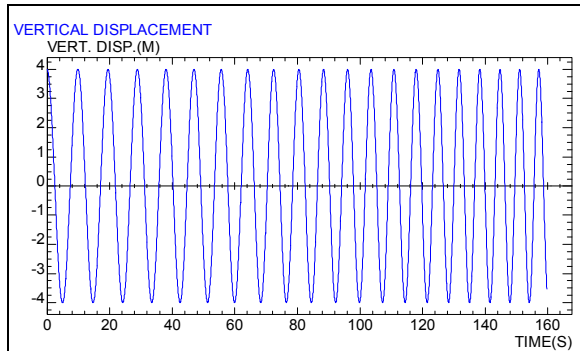
Slika 7.16. Kutna brzina broda – ljuljanje



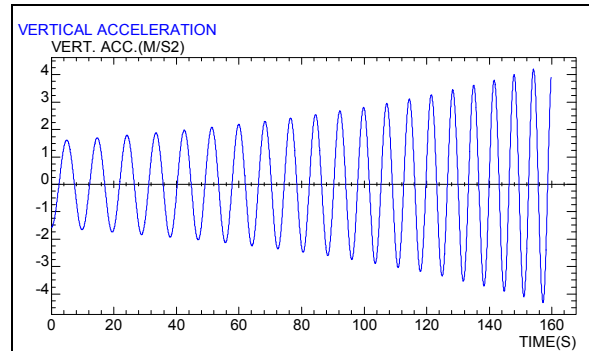
Slika 7.17. Kutno ubrzanje broda – ljuhanje



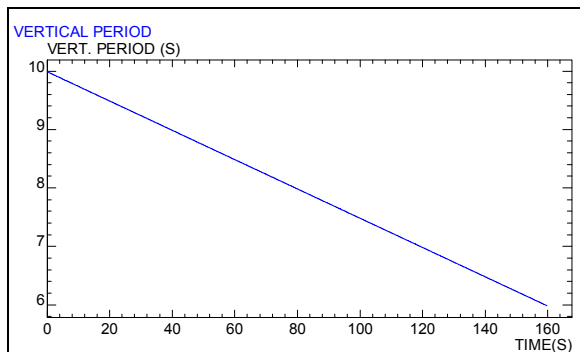
Slika 7.18. Period ljuhanja broda



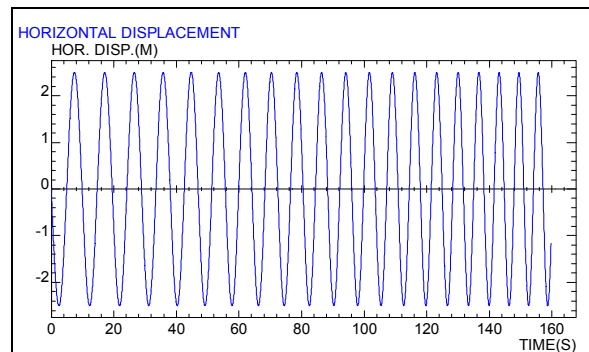
Slika 7.19. Vertikalni pomak broda (poniranje)



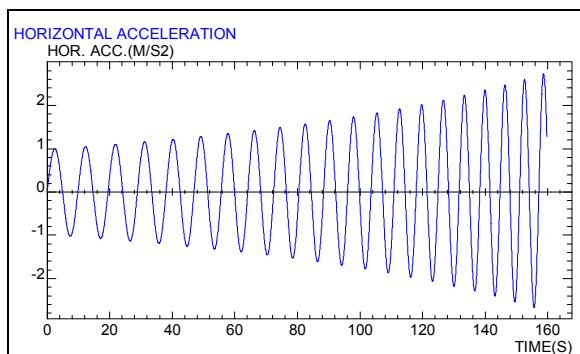
Slika 7.20. Vertikalno ubrzanje broda (poniranje)



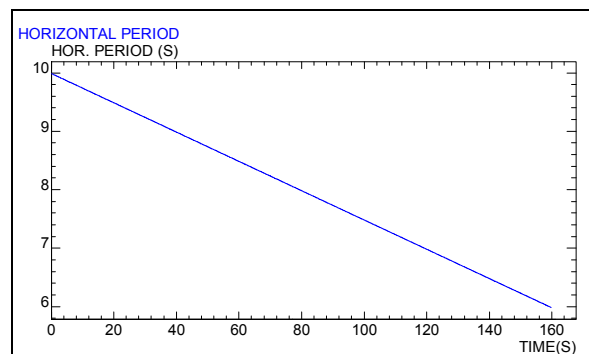
Slika 7.21. Period vertikalnog gibanja broda (poniranje)



Slika 7.22. Horizontalni pomak broda (zanošenje)



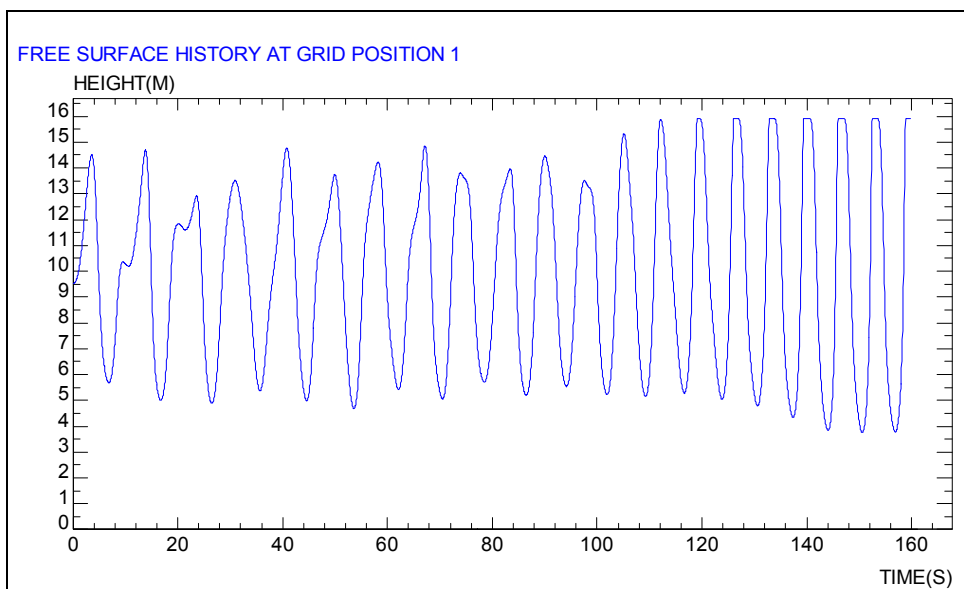
Slika 7.23. Horizontalno ubrzanje broda (zanošenje)



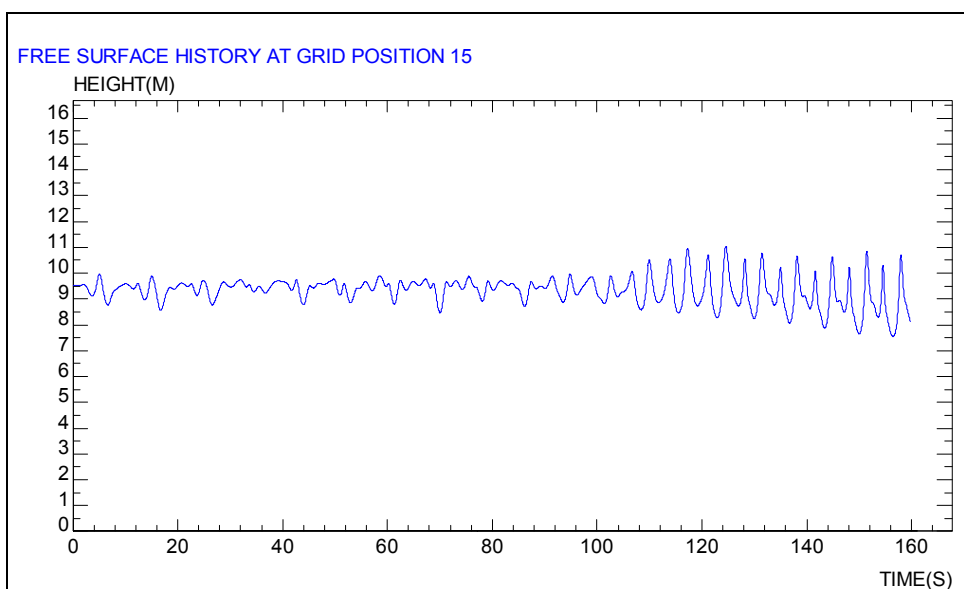
Slika 7.24. Period horizontalnog gibanja broda (zanošenje)

Napomena:

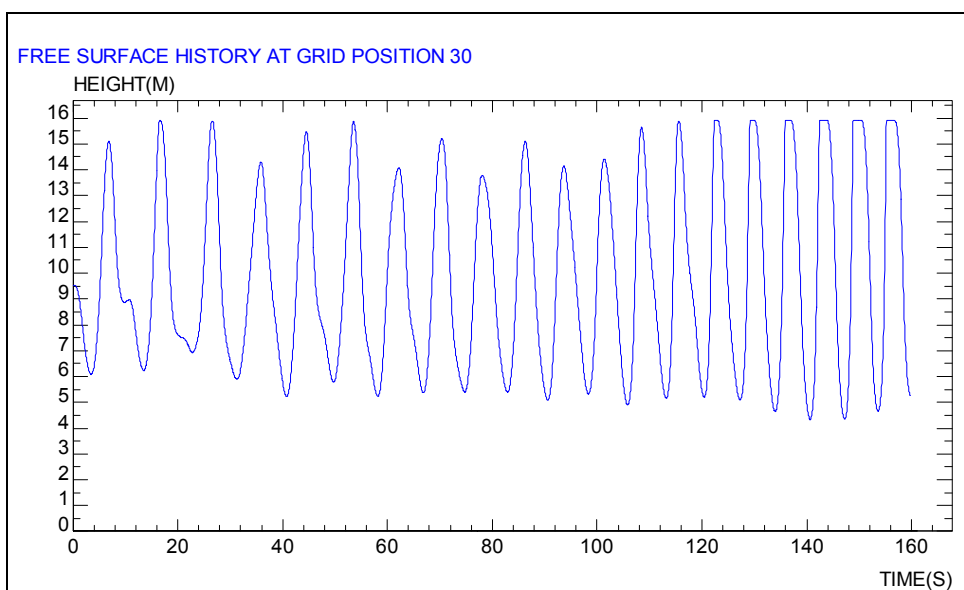
Budući da su vertikalni pomak (poniranje) i vertikalno ubrzanje jednaki za sve slučajeve, prikazani su samo ovdje. Isto vrijedi i za horizontalni pomak (zanošenje) i horizontalno ubrzanje za sve slučajeve gdje se razmatra ljuhanje broda. Zastajkivanje broda ne uzima se u obzir.



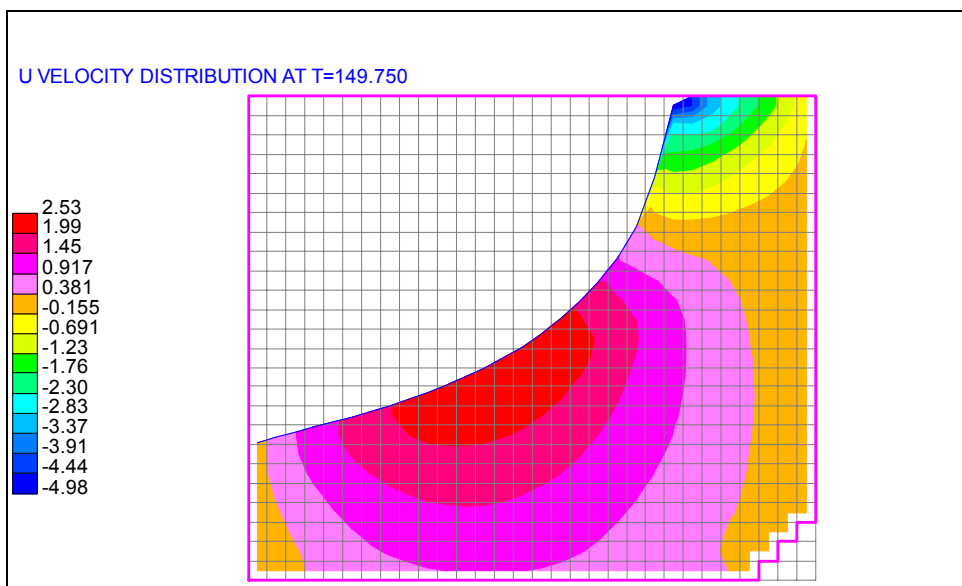
Slika 7.25. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 1



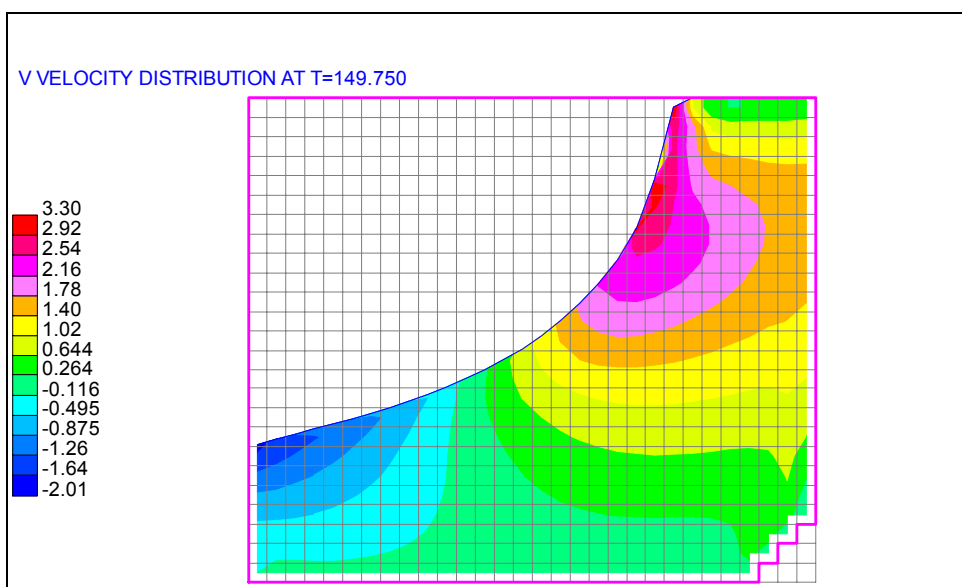
Slika 7.26. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 15



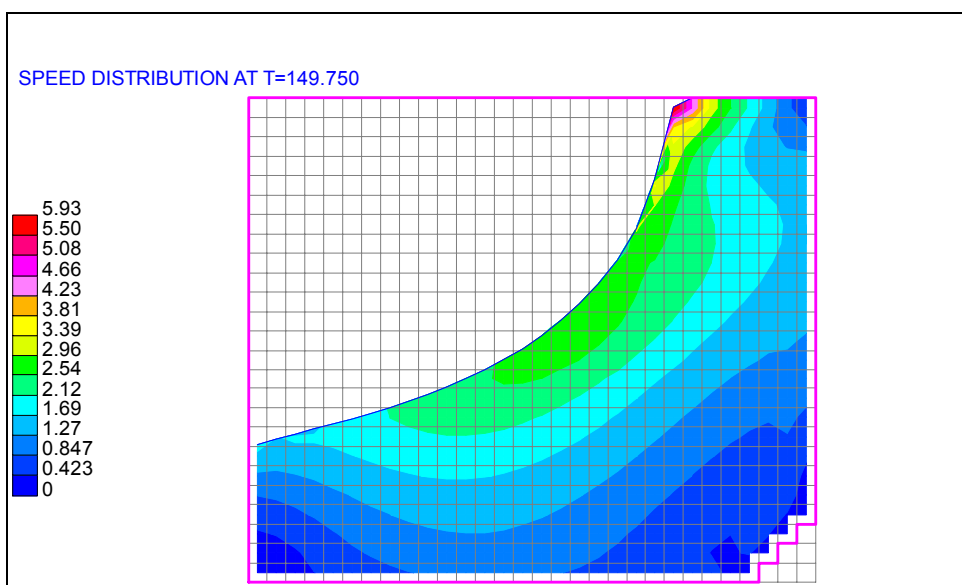
Slika 7.27. Slobodna površina u središnjem tanku uslijed ljuljanja – stupac 30



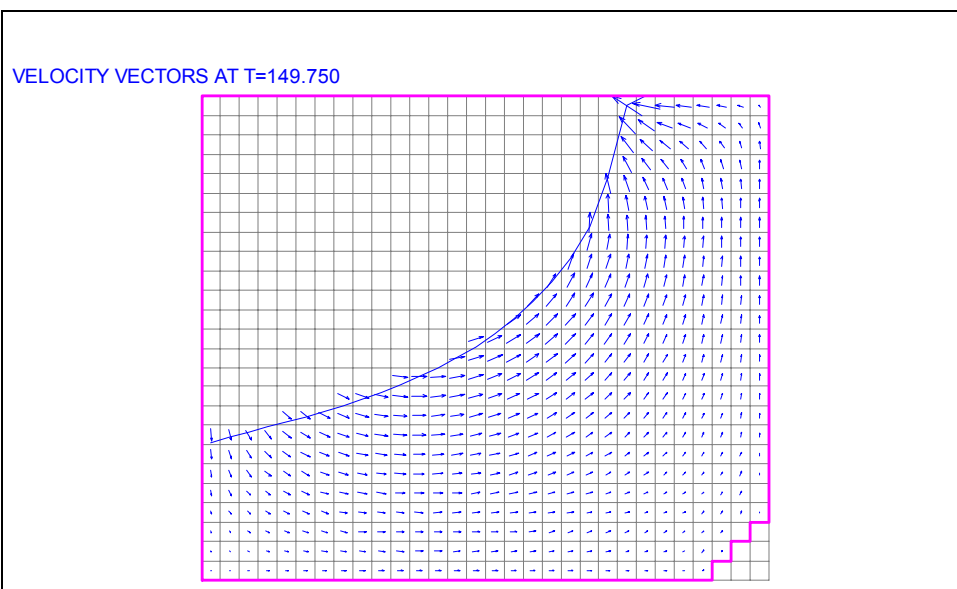
Slika 7.28. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed ljućanja u $t=149,75$ s



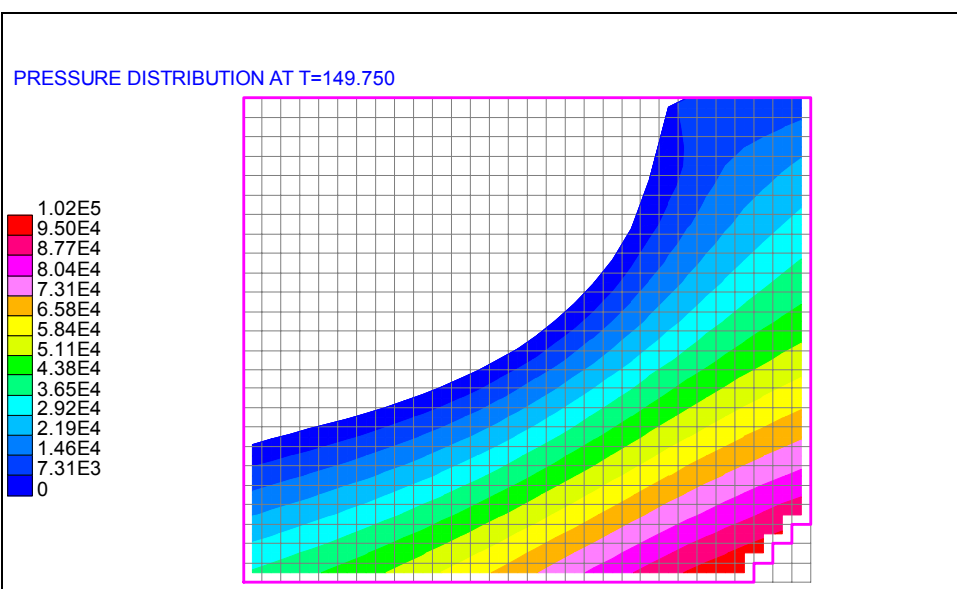
Slika 7.29. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed ljućanja u $t=149,75$ s



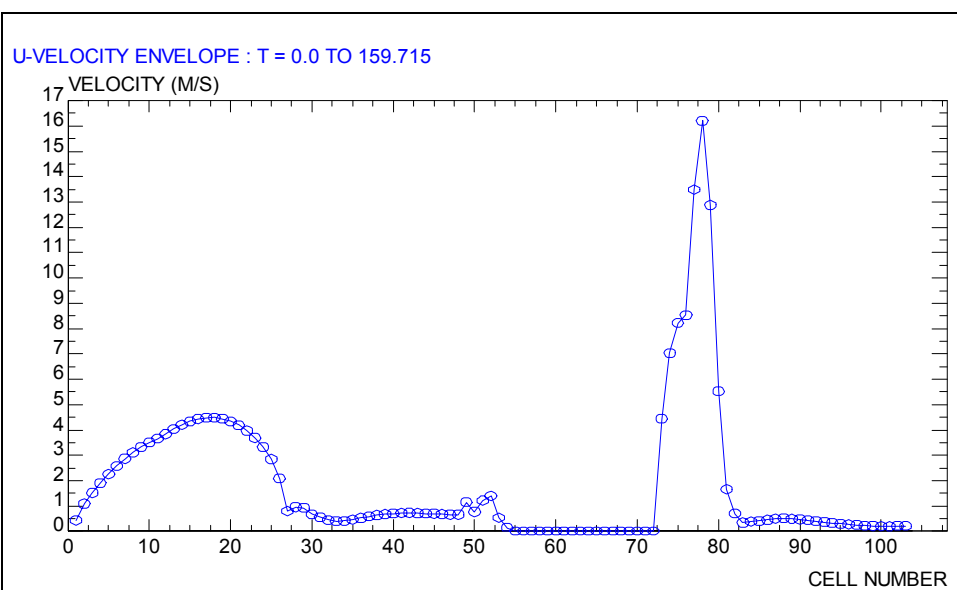
Slika 7.30. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed ljućanja u $t=149,75$ s



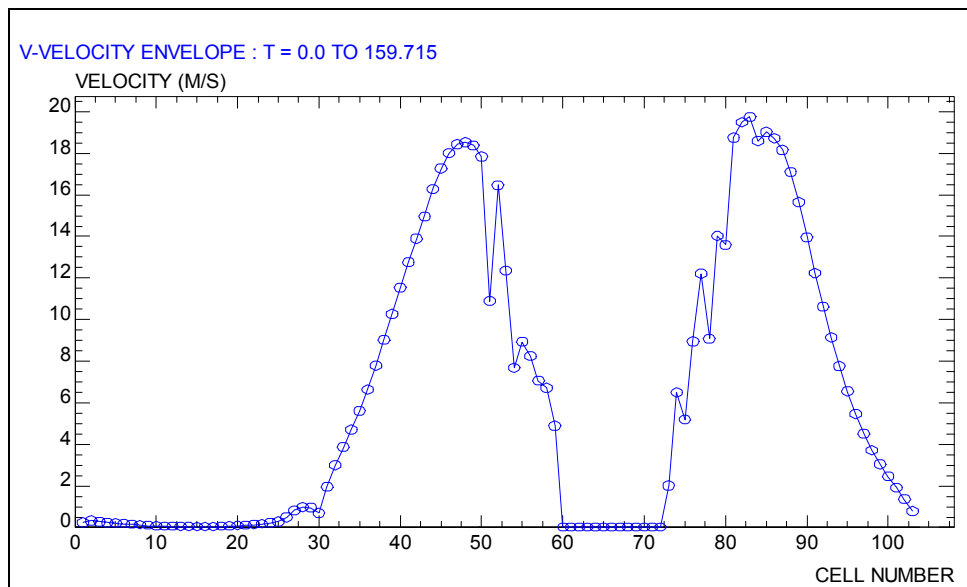
Slika 7.31. Vektori brzina u središnjem tanku uslijed ljućanja u $t=149,75$ s



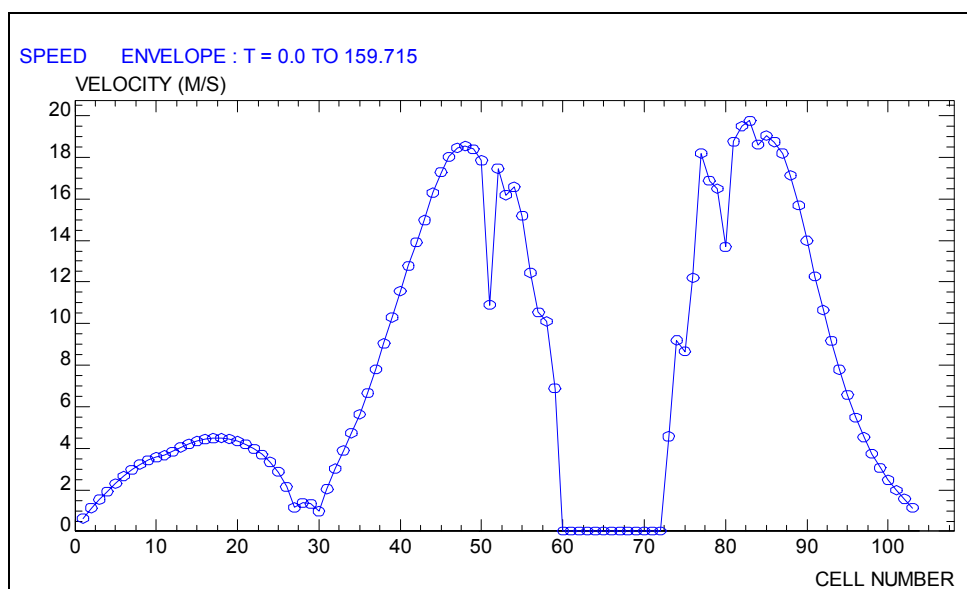
Slika 7.32. Tlak [N/m²] u središnjem tanku uslijed ljućanja u $t=149,75$ s



Slika 7.33. Ovojnica u brzina u središnjem tanku uslijed ljućanja

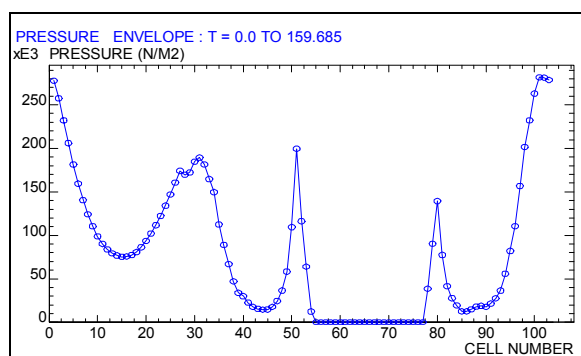


Slika 7.34. Ovojnica v brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja

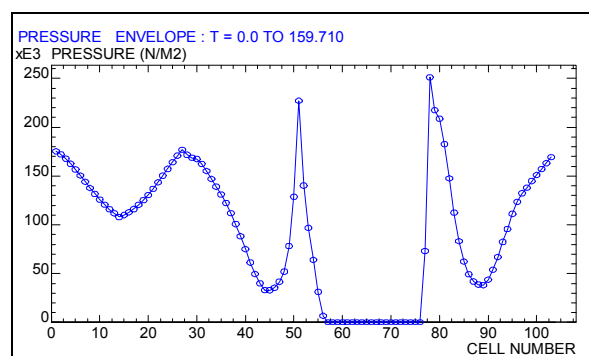


Slika 7.35. Ovojnica ukupnih brzina u središnjem tanku uslijed ljuljanja

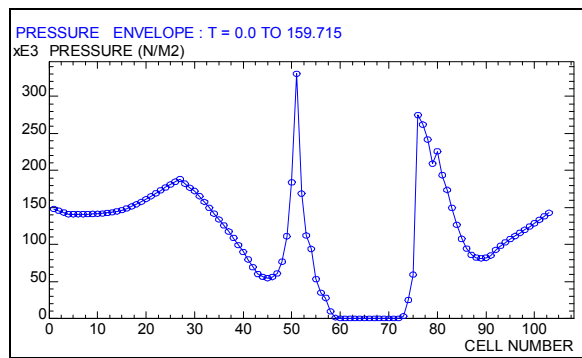
Sljedeće slike prikazuju ovojnice tlaka za sve razine punjenja, za središnji tank broda, uslijed ljuljanja. Na njima je moguće vidjeti na kojim ćelijama, odnosno na kojim dijelovima opločenja tanka, se pojavljuju najviši tlakovi i koliki je njihov iznos. Na slikama od 7.36. do 7.39. vidljivo je kako postoji dio sa nultim vrijednostima tlaka, koji predstavlja pokrov tanka.



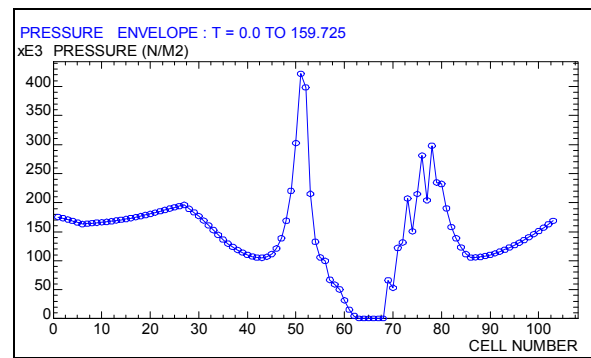
Slika 7.36. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 30%



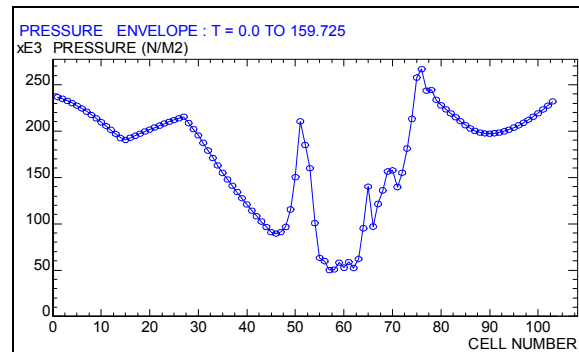
Slika 7.37. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 45%



Slika 7.38. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 60%

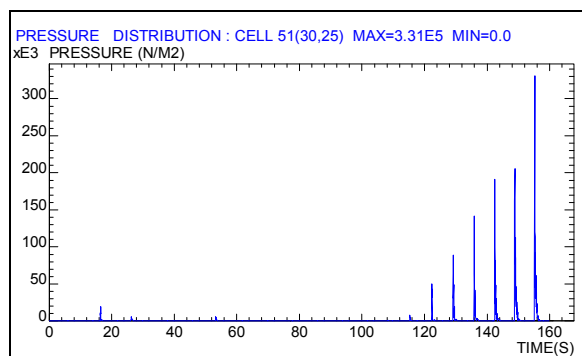


Slika 7.39. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 75%

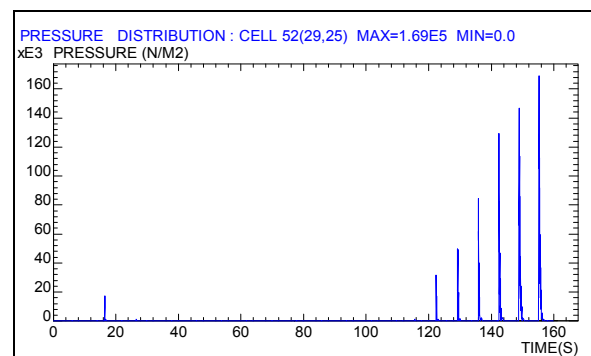


Slika 7.40. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed ljuljanja – punjenje 90%

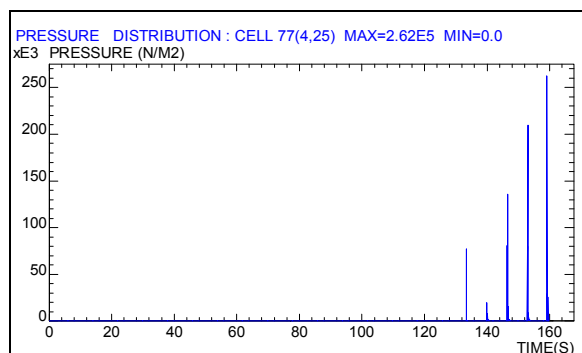
Slika 7.40. pokazuje kako su za razinu punjenja od 90% svi dijelovi tanka izloženi zapljuskivanju, što je imajući u vidu visoku razinu punjenja i bilo za očekivati. Ponekad je za analizu strukturnog odziva potrebno znati vremensku promjenu opterećenja. Sljedeće slike prikazuju vremenske promjene tlaka za nekoliko ćelija, za koje se prema Slici 7.38. mogu očekivati maksimalne vrijednosti (punjenje 60%).



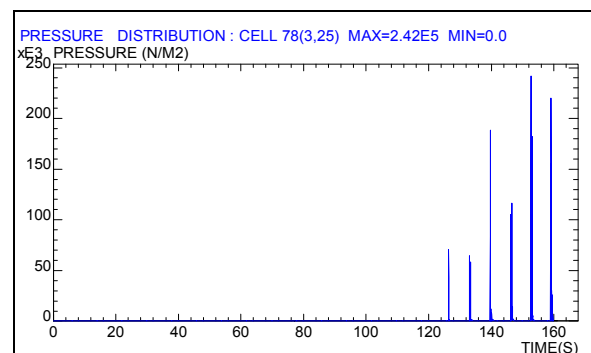
Slika 7.41. Vremenska promjena tlaka – ćelija 51



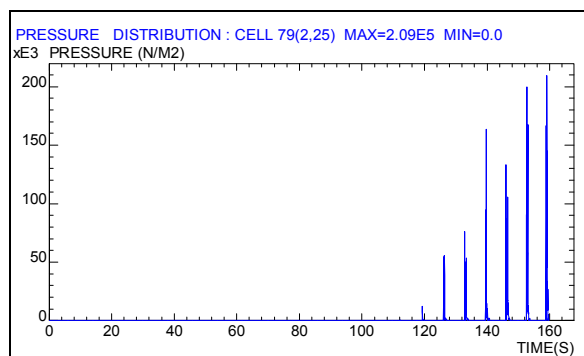
Slika 7.42. Vremenska promjena tlaka – ćelija 52



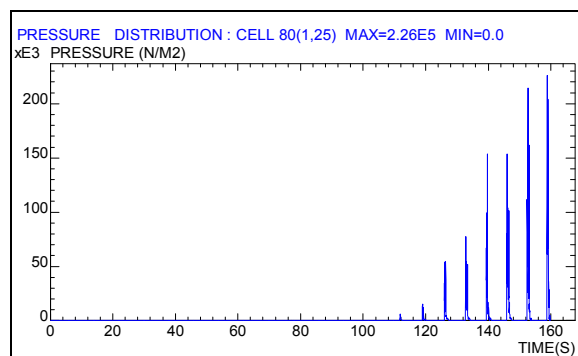
Slika 7.43. Vremenska promjena tlaka – ćelija 77



Slika 7.44. Vremenska promjena tlaka – ćelija 78



Slika 7.45. Vremenska promjena tlaka – ćelija 79



Slika 7.46. Vremenska promjena tlaka – ćelija 80

7.6.2. Zapljuskivanje uslijed posrtanja broda

Za određivanje potrebnih razina proračuna za središnji tank uslijed posrtanja, mjerodavni su rezultati koje prikazuje Slika 7.9. Vidljivo je da je za središnji tank, za razine punjenja od 15% i 30%, pri posrtanju broda, dovoljna druga razina proračuna, dok je za ostale razine potrebno izvršiti numerički proračun (treća proračunska razina).

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI DRUGOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

Tablica 7.3. Opterećenja za središnji tank uslijed posrtanja – punjenja 15% i 30%

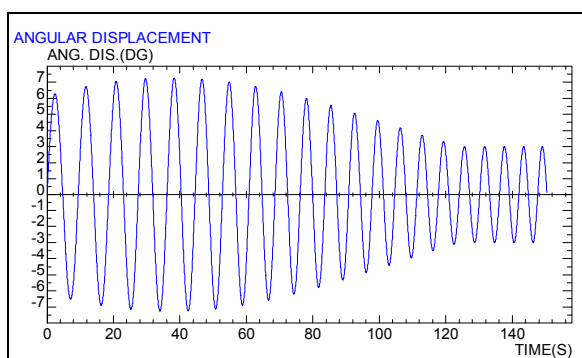
Razina punjenja [%]	Dubina fluida [m]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]
		15%	30%
95	15,1	0,0	0,0
90	14,3	0,0	123,0
85	13,5	0,0	123,1
80	12,7	0,0	124,1
75	11,9	0,0	126,0
70	11,1	0,0	128,7
65	10,3	0,0	132,2
60	9,5	0,0	136,4
55	8,7	0,0	188,2
50	7,9	0,0	198,4
45	7,2	0,0	208,6
40	6,4	151,0	218,9
35	5,6	161,3	229,1
30	4,8	171,5	239,3
25	4,0	181,7	249,5
20	3,2	191,9	259,7
15	2,4	202,2	270,0
10	1,6	212,4	280,2
5	0,8	222,6	290,4

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI TREĆOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

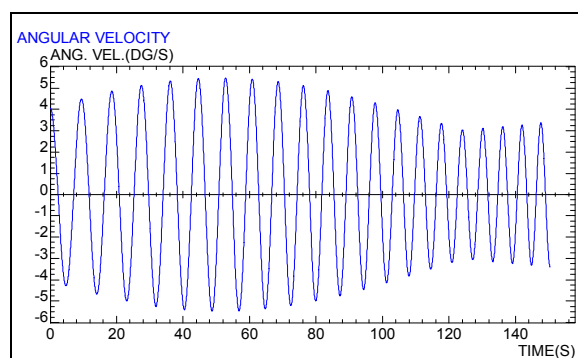
Ovdje su prikazani rezultati proračuna za središnji tank, samo za razinu punjenja od 75% (kao i u prethodnoj točki, ovojnica tlaka prikazana je za sve razine punjenja). Za ostale razine, rezultati se mogu dobiti pomoću ulaznih lista programa „SDA Fluids“, prikazanih u Prilogu C.

Budući da se središnji tank nalazi vrlo blizu središta rotacije, nije za očekivati značajno povećanje hidrodinamičkih opterećenja uslijed zapljuskivanja pri posrtanju.

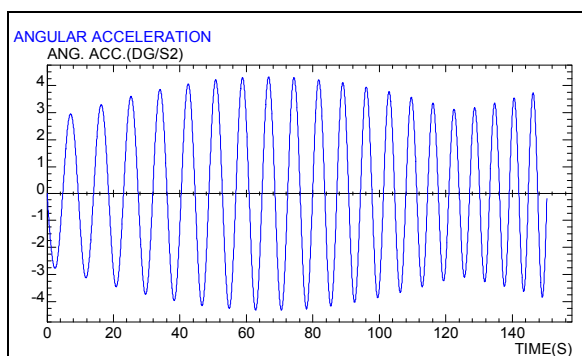
Prikazi nekih veličina za odabrani vremenski trenutak, dani su u nešto drukčijoj formi od prikaza u 7.6.1., kako bi se čitatelju pružio uvid u mogućnosti korištene programske podrške po pitanju vizualizacije rezultata. Inače, zgodno je za napomenuti da su i ovdje, kao i u prethodnoj točki prikazani rezultati proračuna brzina i tlakova za vremenski trenutak koji je odabralo računalo, ali indirektno je moguće i odabrati ga po volji. Prema autorovu opažanju, odabir trenutka, za prvu provedbu proračuna, svakako je zgodnije prepustiti računalnom algoritmu, a tek onda, kada se vidi distribucija tlaka u vremenu i prostoru, prikladno je napraviti vizualizaciju rezultata za neke karakteristične trenutke (trenutak, pojave maksimalnog tlaka, maksimalne brzine ili neki drugi, po volji odabrani vremenski trenutak). Računalo je za ovaj slučaj odabralo trenutak $t=140,395$ s, pa su i slike brzina i tlakova prikazane upravo u tom trenutku (Slika 7.51. do Slika 7.62.).



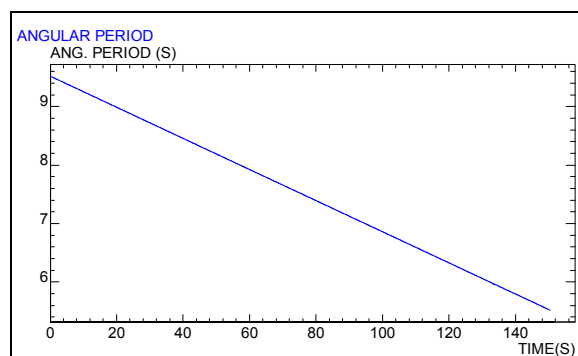
Slika 7.47. Kutni pomak broda – posrtanje



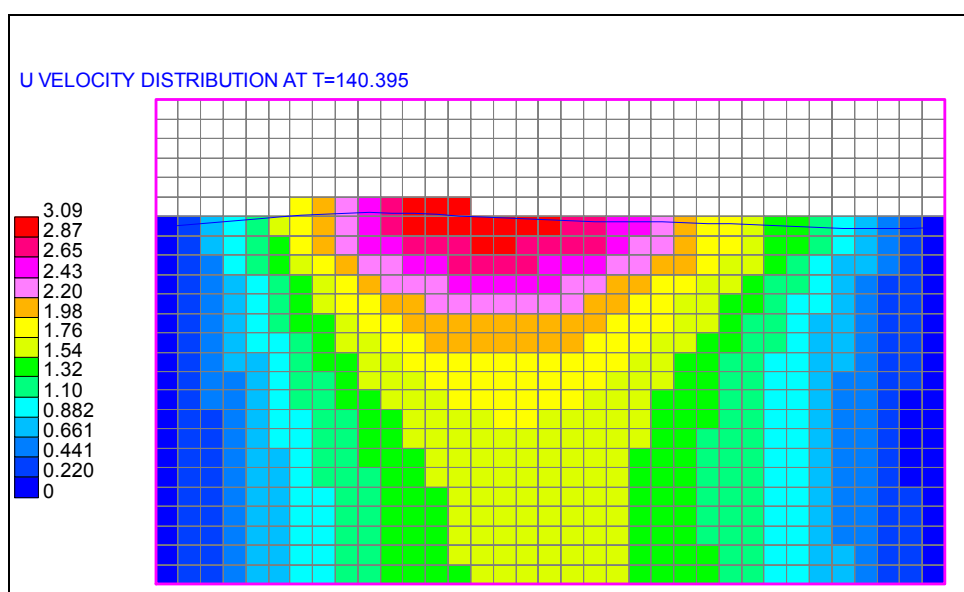
Slika 7.48. Kutna brzina broda – posrtanje

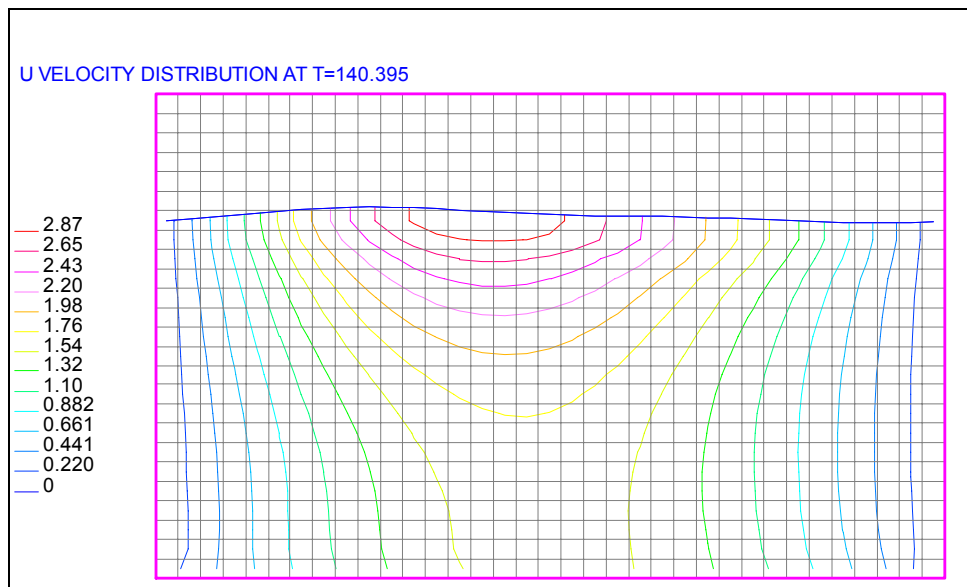


Slika 7.49. Kutno ubrzanje broda – posrtanje

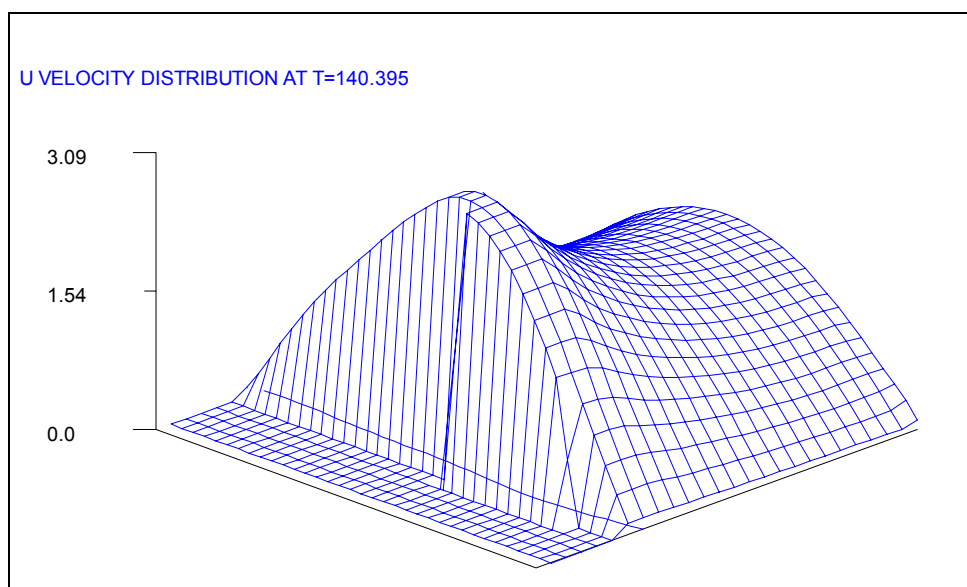


Slika 7.50. Period posrtanja broda

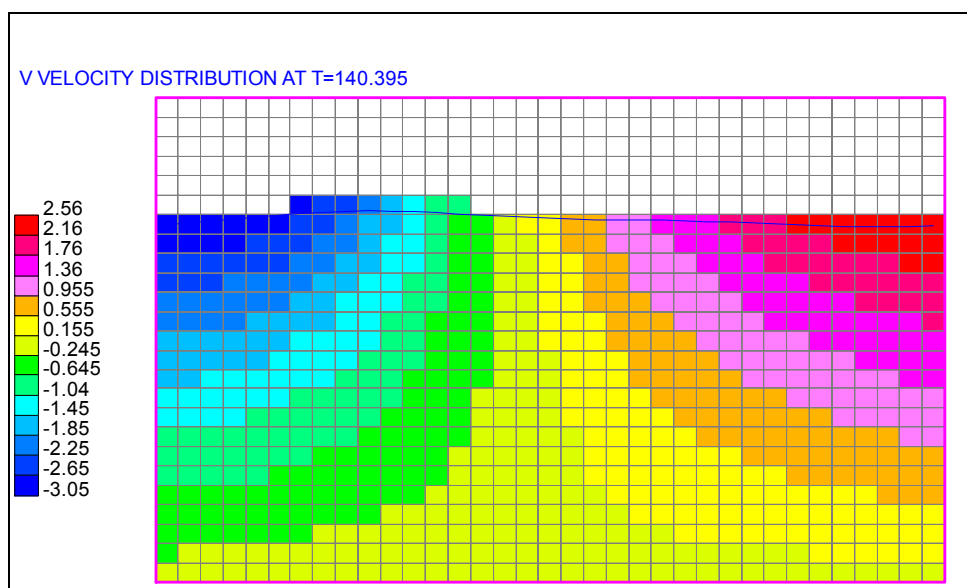
Slika 7.51. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)



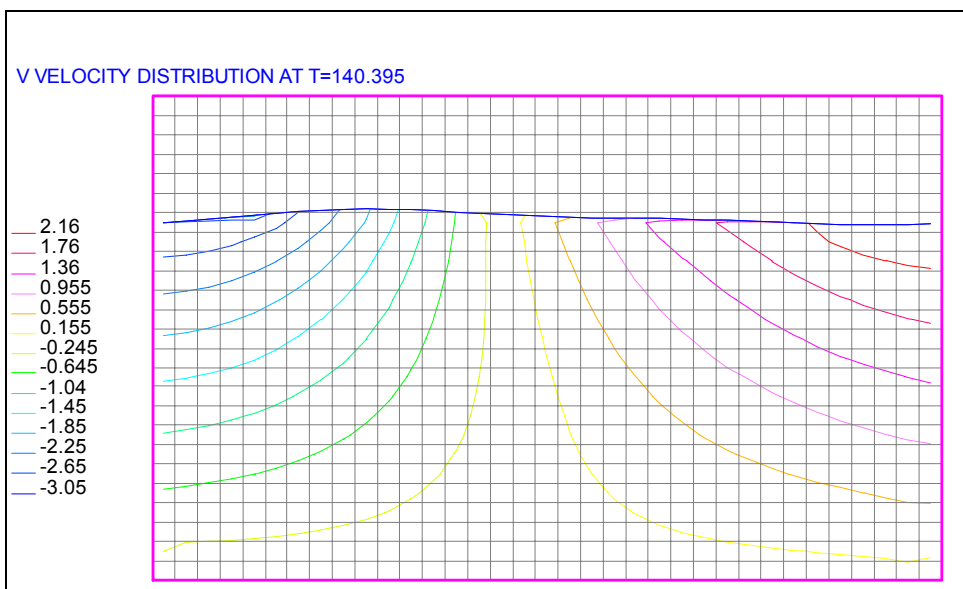
Slika 7.52. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)



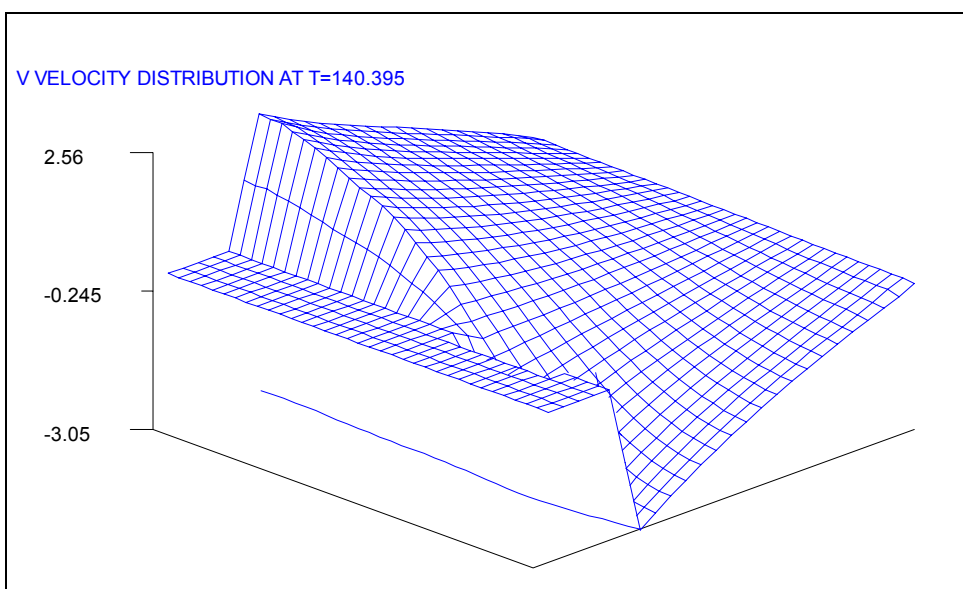
Slika 7.53. Brzine u [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)



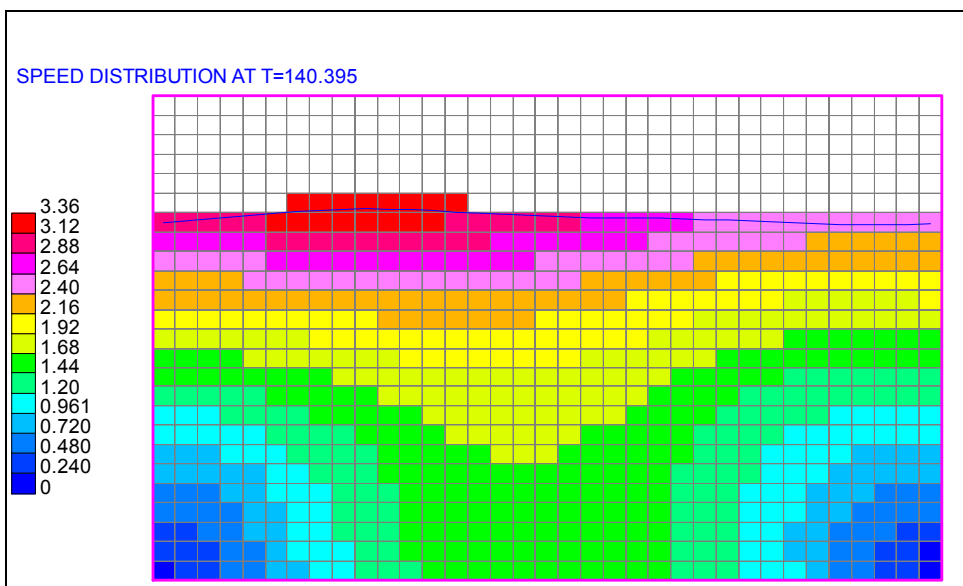
Slika 7.54. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)



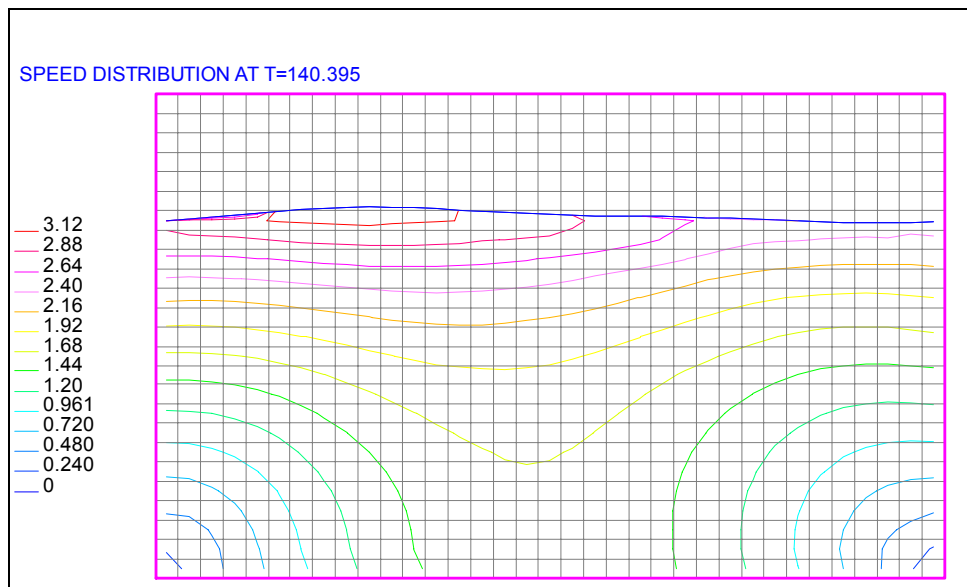
Slika 7.55. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)



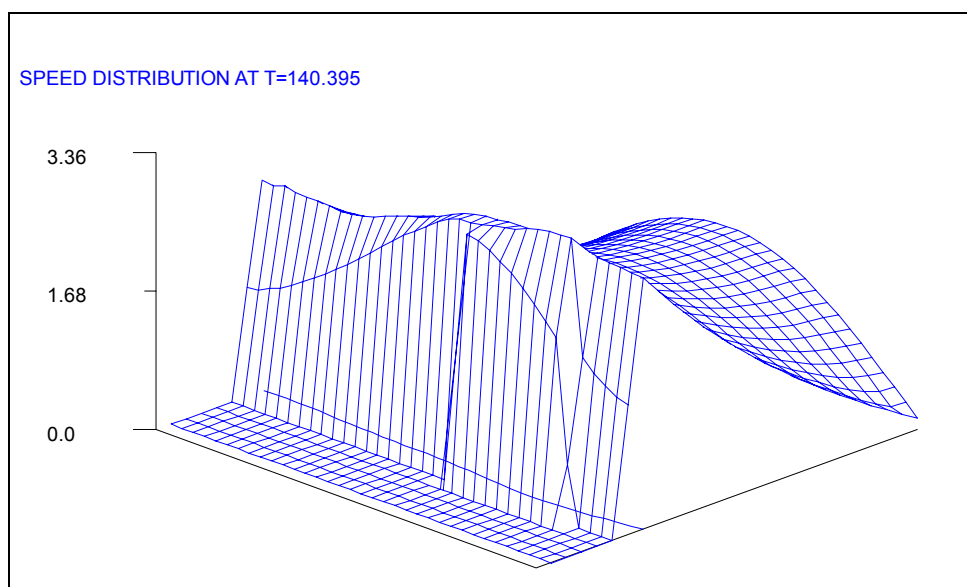
Slika 7.56. Brzine v [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)



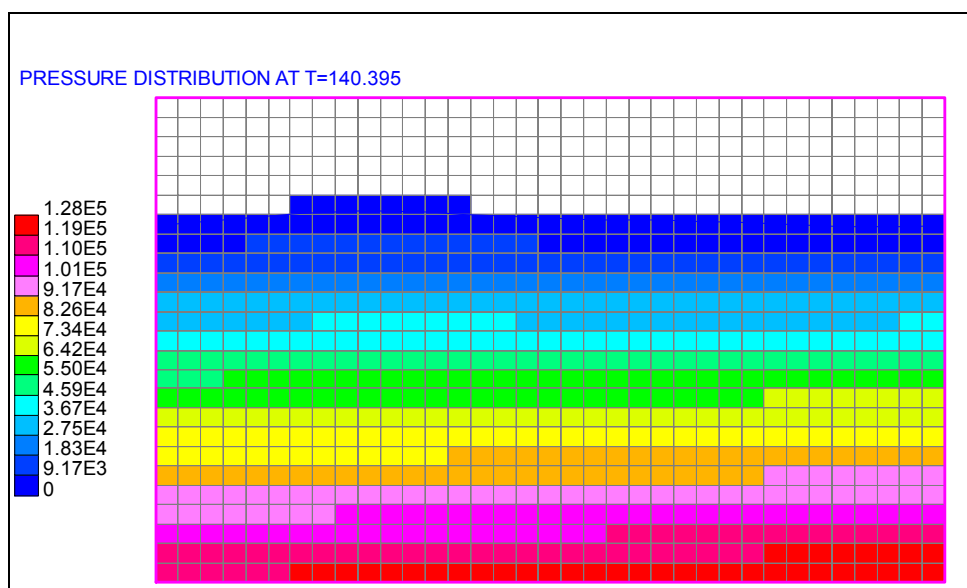
Slika 7.57. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)



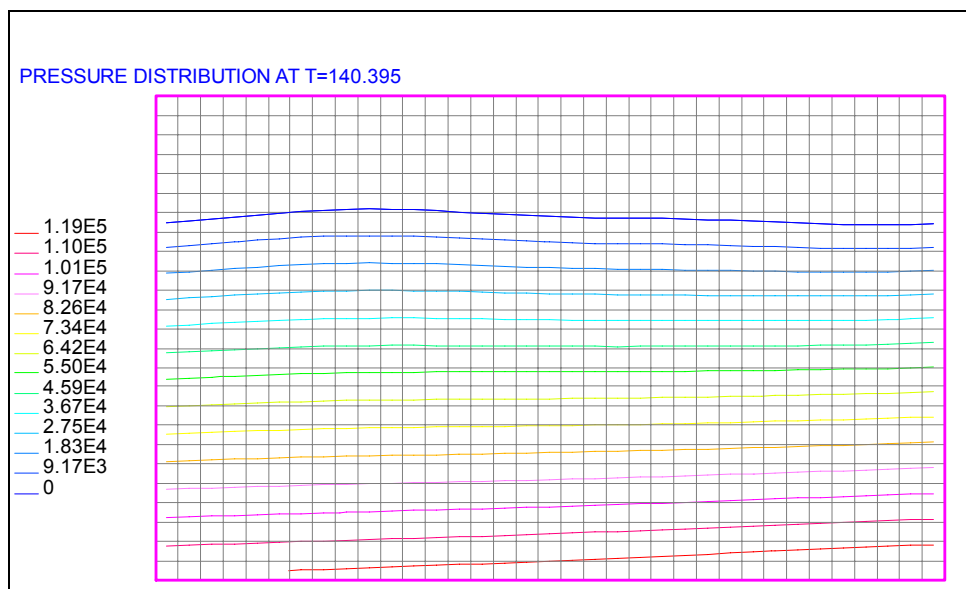
Slika 7.58. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)



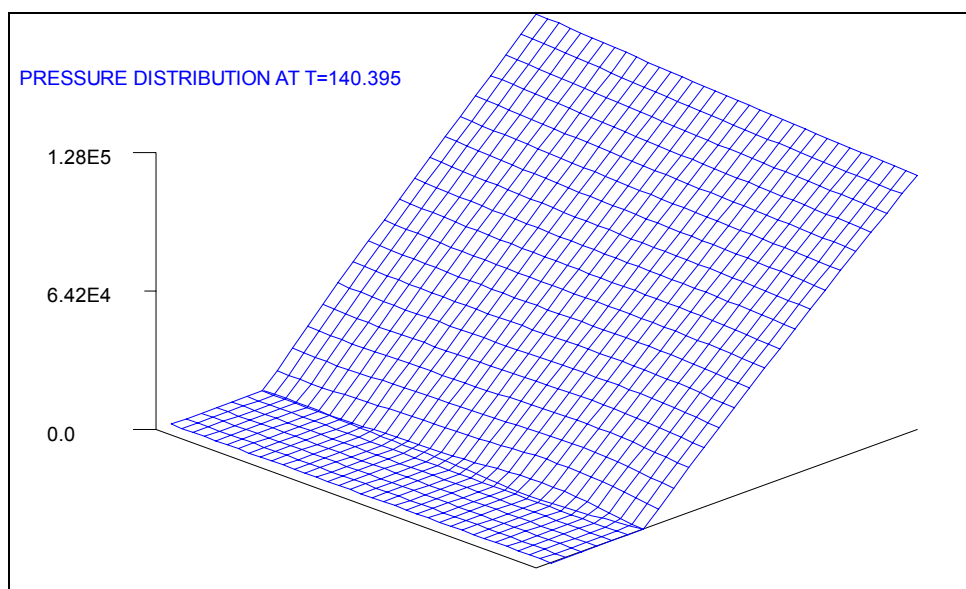
Slika 7.59. Ukupne brzine [m/s] u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)



Slika 7.60. Tlak [N/m^2] u središnjem tanku uslijed posrtanja (ćelije u boji)

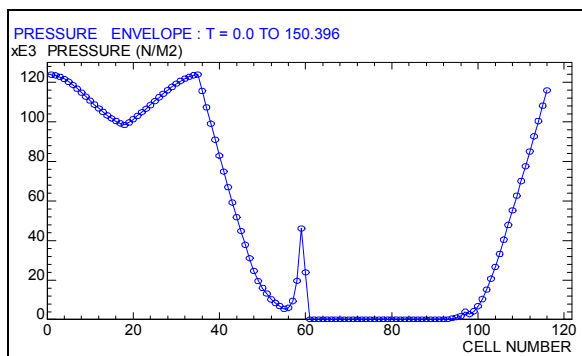


Slika 7.61. Tlak $[N/m^2]$ u središnjem tanku uslijed posrtanja (krivulje)

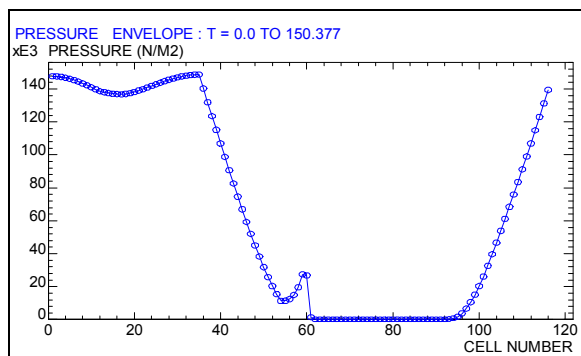


Slika 7.62. Tlak $[N/m^2]$ u središnjem tanku uslijed posrtanja (3D prikaz)

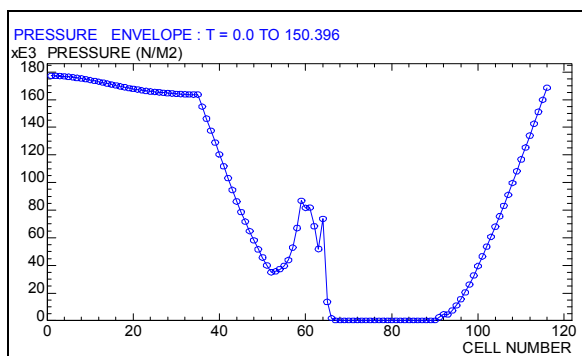
Sljedeće slike prikazuju ovojnice tlaka za sve odabrane razine punjenja, za središnji tank broda, uslijed posrtanja. I u slučaju posrtanja, kao i ranije za ljuljanje postoje dijelovi tanka koji nisu izloženi zapljuskivanju (pokrov tanka), na čijim ćelijama su prepoznatljive nulte vrijednosti tlaka.



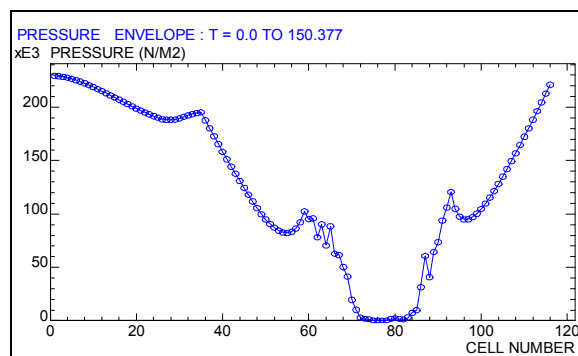
Slika 7.63. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 45%



Slika 7.64. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 60%



Slika 7.65. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 75%



Slika 7.66. Ovojnica tlaka u središnjem tanku uslijed posrtanja – punjenje 90%

7.7. Rezultati proračuna zapljuskivanja za pramčani tank

7.7.1. Zapljuskivanje uslijed ljuljanja broda

Slika 7.10. ukazuje da se za pramčani tank (ljuljanje broda), kao ranije i za središnji, ni za jednu razinu punjenja ne može primijeniti prva razina proračuna. Druga razina proračuna može se primijeniti za razinu punjenja od 15%, a za ostale razine (osim 99%) potreban je numerički proračun (treća proračunska razina).

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI DRUGOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

Tablica 7.4. Opterećenja za pramčani tank uslijed ljuljanja – punjenje od 15%

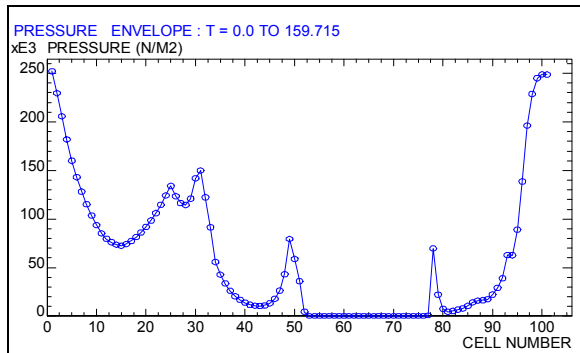
Razina punjenja [%]	Dubina fluida [m]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]
		15%
95	15,1	0,0
90	14,3	0,0
85	13,5	0,0
80	12,7	0,0
75	11,9	0,0
70	11,1	0,0
65	10,3	0,0
60	9,5	0,0
55	8,7	0,0
50	7,9	126,1
45	7,2	138,8
40	6,4	151,4
35	5,6	164,1
30	4,8	176,7
25	4,0	189,4
20	3,2	202,0
15	2,4	214,7
10	1,6	227,3
5	0,8	240,0

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI TREĆOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

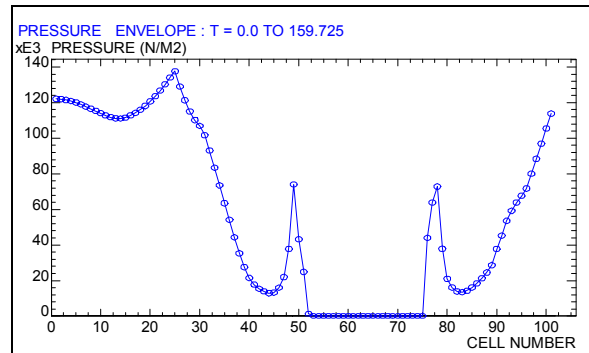
Radi opsežnosti ovdje su prikazane samo ovojnice tlaka, kao polazna točka za eventualne proračune strukturnog odziva, a sve ostale podatke moguće je, kao i

u prethodnim slučajevima, jednostavno dobiti pomoću ulaznih lista programa „SDA Fluids“ prikazanih u Prilogu C.

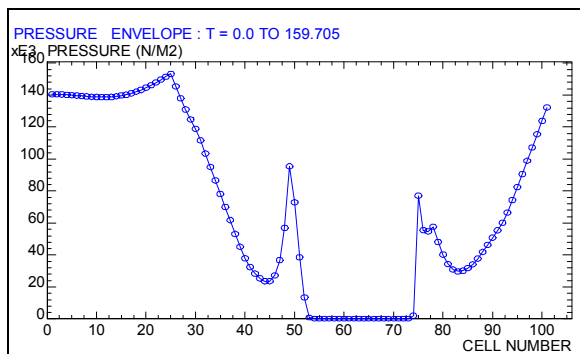
Treba napomenuti da se pramčanom tanku mijenja širina po duljini broda (smanjuje se prema pramcu), pa rezultati numeričkog proračuna, strogo gledajući, vrijede samo na mjestu najveće širine (maksimalna širina ulazni je podatak za ranije spominjani program „SDA Tank Assessment“ koji tvori dio ulazne liste za program „SDA Fluids“).



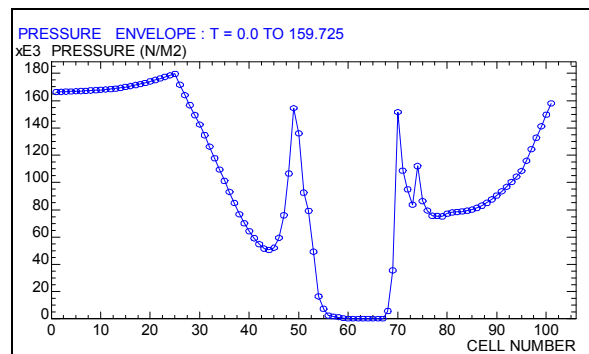
Slika 7.67. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 30%



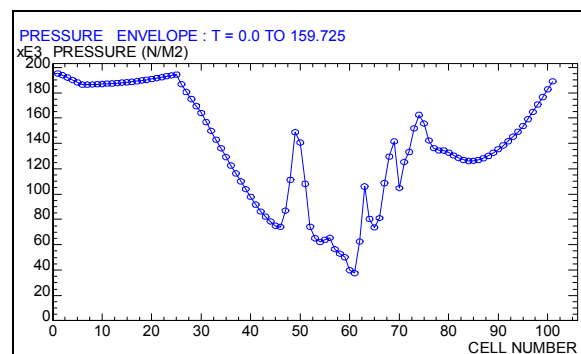
Slika 7.68. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 45%



Slika 7.69. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 60%



Slika 7.70. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 75%



Slika 7.71. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed ljuljanja – punjenje 90%

Rezultate dobivene na prethodnim slikama nije potrebno posebno komentirati, jer vrijedi analogija sa komentarima za ekvivalentne slike za središnji tank (Slika 7.36. do Slika 7.40.). I u ovom slučaju, za razinu punjenja od 90% (Slika 7.71.) nema ćelija (područja) s nultim vrijednostima tlaka, karakterističnih za ostale razine punjenja (Slika 7.67. do Slika 7.70.), što znači da je za spomenutu razinu punjenja, cijelo opločenje tanka izloženo djelovanju hidrodinamičkog opterećenja. Vremenska distribucija tlaka za pojedine ćelije, radi sažetosti, za ovaj slučaj nije prikazivana.

7.7.2. Zapljuskivanje uslijed posrtanja broda

Za određivanje potrebnih razina proračuna za pramčani tank uslijed posrtanja broda, mjerodavni su rezultati koje prikazuje Slika 7.11. Na njoj je vidljivo kako je za razine punjenja od 15% i 30% potrebna (dovoljna) druga razina proračuna, dok je za ostale razine potrebno izvršiti numerički proračun (treća proračunska razina).

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI DRUGOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

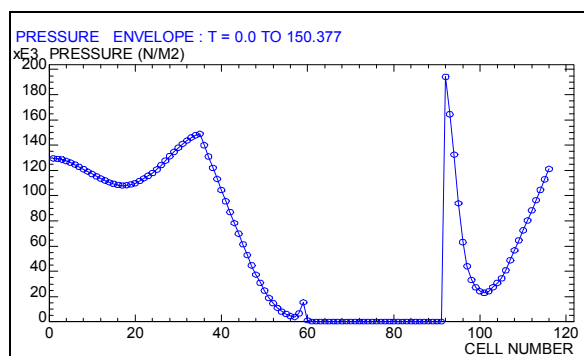
Rezultati u sljedećoj tablici dio su izlazne liste programa „SDA Tank Assessment“.

Tablica 7.5. Opterećenja za pramčani tank uslijed posrtanja – punjenja 15% i 30%

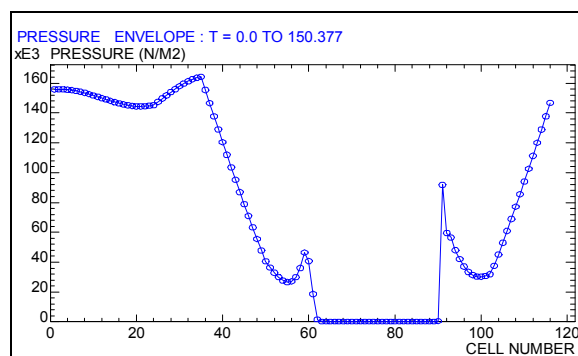
Razina punjenja [%]	Dubina fluida [m]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]	Tlak na pojedinoj razini [kN/m ²]
		15%	30%
95	15,1	0,0	0,0
90	14,3	0,0	123,3
85	13,5	0,0	125,7
80	12,7	0,0	129,2
75	11,9	0,0	133,5
70	11,1	0,0	138,6
65	10,3	0,0	144,5
60	9,5	0,0	151,1
55	8,7	0,0	190,4
50	7,9	0,0	203,0
45	7,2	0,0	215,7
40	6,4	153,2	228,3
35	5,6	165,9	241,0
30	4,8	178,5	253,6
25	4,0	191,2	266,3
20	3,2	203,8	278,9
15	2,4	216,5	291,6
10	1,6	229,1	304,2
5	0,8	241,8	316,9

REZULTATI PRORAČUNA DOBIVENI TREĆOM PRORAČUNSKOM RAZINOM

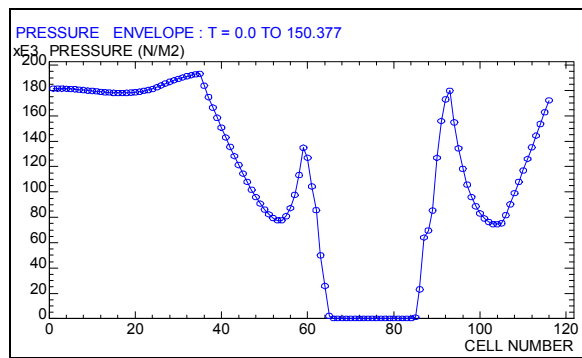
Analogno prikazu iz prethodne točke, ovdje su prikazane samo ovojnice tlaka, koje mogu služiti za određivanje dijelova opločenja, izloženih najvećem opterećenju. Ukoliko bi se analizirao strukturni odziv, bilo bi potrebno izvršiti korekciju ovdje prikazanih opterećenja u skladu sa opisom u 7.2. (Slika 7.7.).



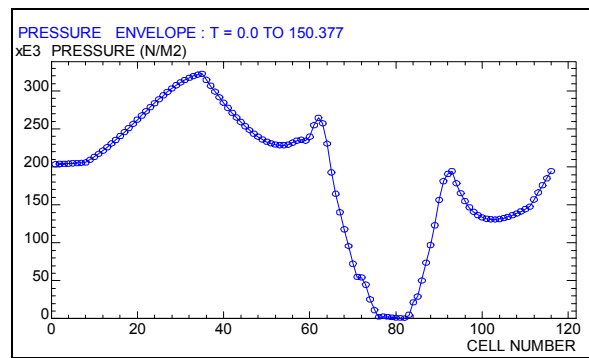
Slika 7.72. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 45%



Slika 7.73. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 60%



Slika 7.74. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 75%



Slika 7.75. Ovojnica tlaka u pramčanom tanku uslijed posrtanja – punjenje 90%

Radi sažetosti rada, ni za ovaj slučaj nije prikazivana vremenska distribucija opterećenja uslijed zapljuskivanja.

7.8. Osvrt na rezultate proračuna dobivene prema SDA postupku

Rezultati proračuna, dobiveni pomoću programa „SDA Tank Assessment“, odnosno „SDA Fluids“, potvrđuju, u prethodnim dijelovima rada spominjanu složenost problema zapljuskivanja, koja se manifestira kroz teškoće predviđanja distribucije maksimalnih hidrodinamičkih opterećenja u vremenu i prostoru. Prema rezultatima na slikama 7.8., 7.9., 7.10. i 7.11., opravdano je tvrditi da se hidrodinamička opterećenja djelomično ispunjenih tankova, za najveći raspon punjenja, ne mogu predviđati (proračunavati) pomoću jednostavnih matematičkih izraza, već je potrebna provedba numeričkog proračuna. Isto tako, valja zapaziti, da za razinu punjenja od 99% nisu potrebni nikakvi proračuni, te na taj način potvrditi u uvodu rada spomenutu činjenicu, da su problemi opterećenja punih tankova, prema pravilima klasifikacijskih društava, uglavnom, obrađeni na zadovoljavajući način. Nadalje, na spomenutim slikama, vidljivo je da se primjena numeričkog proračuna traži za više razine punjenja, kada se ovisno o gibanju broda, može očekivati udar tekućine na pokrov tanka. Treba napomenuti da je u radu provjerena senzitivnost rezultata prema gustoći mreže, pri čemu je utvrđeno da je izbor gustoće mreže zapravo nebitan ukoliko se proračun provodi poštujući ograničenja programa, spomenuta u 7.2., odnosno upute opisane u [19].

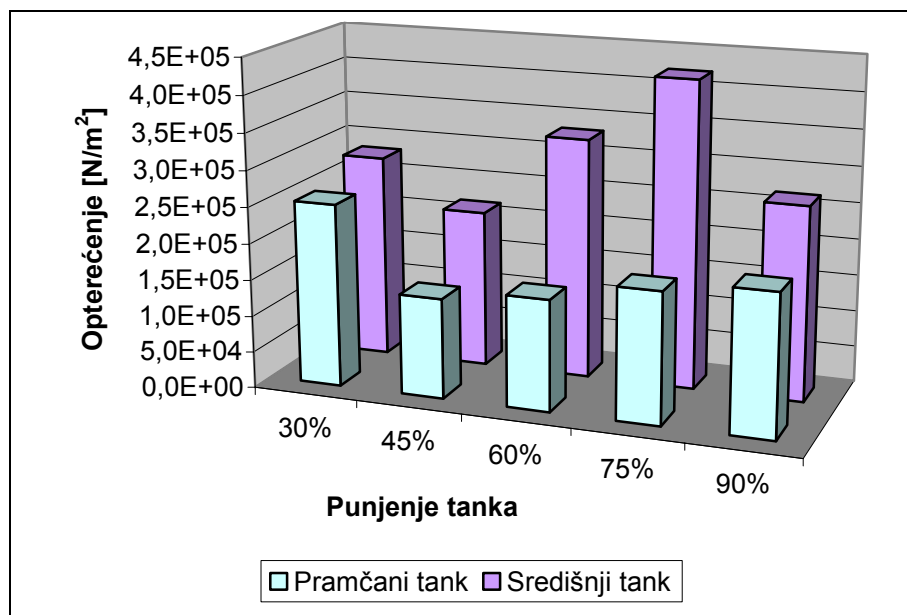
Maksimalni tlakovi, koji primjerice za slučaj na Slici 7.75. iznose i preko 300 kN/m², svakako se čine prevelikima, ali valja imati na umu da se radi o dinamičkim tlakovima, kojima se brodska konstrukcija, osim svojom krutošću, opire i svojom tromošću. Stoga, potrebno je narinuti ih na konstrukciju, imajući u vidu njihovo trajanje, i tek nakon analize strukturnog odziva zaključivati o sposobnosti konstrukcije za njihovo podnošenje.

Ukoliko se takvi tlakovi pokažu prevelikima, njihovo smanjivanje najlakše je ostvariti smanjivanjem duljine slobodne površine (primjerice ugrađivanjem pljuskača). Prema izrazu (4.14), vidljivo je da smanjenje duljine slobodne površine uzrokuje i smanjenje prirodnog perioda osciliranja fluida. Imajući na umu rezonantnu prirodu fenomena zapljuskivanja, i činjenicu da su prirodni periodi broda razmjerno veliki, lako je zaključiti da ugrađivanje pljuskača pomiče frekvencije osciliranja fluida izvan rezonantnog područja, na više.

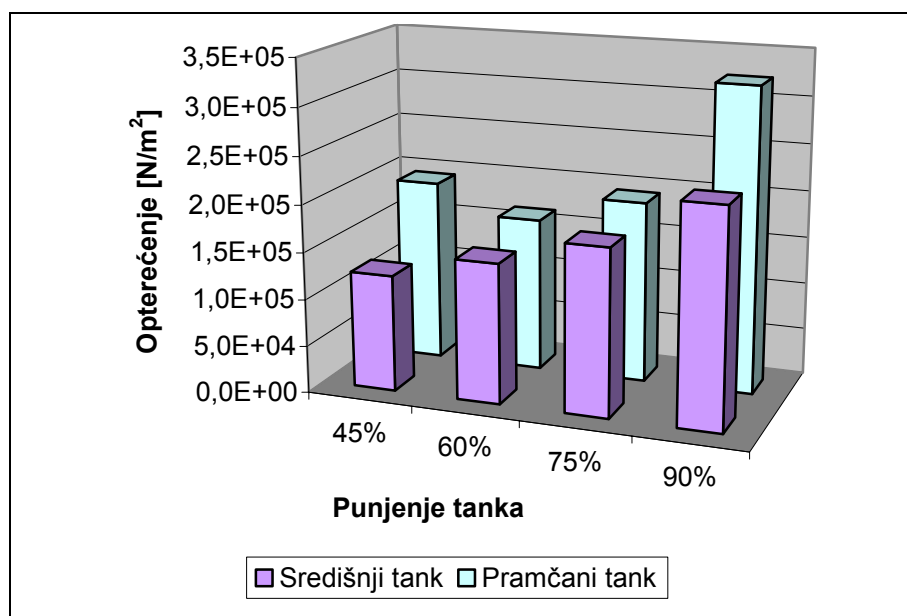
Ukoliko se zanemari trajanje opterećenja, zanimljivo je prikazati maksimalna opterećenja u ovisnosti o punjenju tanka, čiji su iznosi dani u tablici na sljedećoj stranici i na temelju kojih su izrađeni histogrami (Slike 7.76. i 7.77.).

Tablica 7.6. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja

Razina punjenja [%]	Opterećenje [N/m ²]			
	Središnji tank		Pramčani tank	
	Ljuljanje	Posrtanje	Ljuljanje	Posrtanje
30	$2,82 \cdot 10^5$	-	$2,43 \cdot 10^5$	-
45	$2,17 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$	$1,38 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^5$
60	$3,31 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$	$1,53 \cdot 10^5$	$1,64 \cdot 10^5$
75	$4,22 \cdot 10^5$	$1,77 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^5$	$1,93 \cdot 10^5$
90	$2,67 \cdot 10^5$	$2,30 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^5$	$3,23 \cdot 10^5$



Slika 7.76. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja pri ljuljanju broda

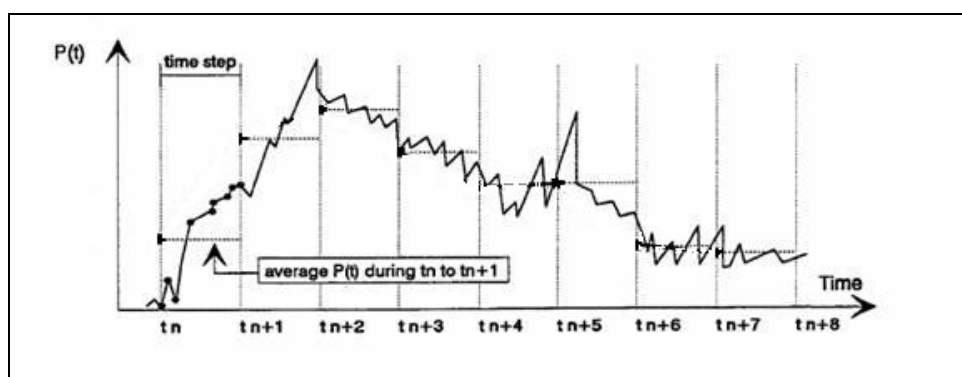


Slika 7.77. Maksimalna opterećenja uslijed zapljuskivanja pri posrtanju broda

Slike 7.76. i 7.77. pokazuju da je teško uočiti pravilnost razmatrajući samo ovisnost maksimalnih opterećenja o punjenju. Naime, za svaku razinu punjenja osim mase fluida koja djeluje na stjenku tanka, mijenja se i prirodna frekvencija fluida, a time i način gibanja fluida, kako je opisano u poglavlju 2. Također, ni trajanje impulsa za sve razine punjenja nije jednako, što je vidljivo iz detaljnijeg prikaza vremenske promjene tlaka u slučaju maksimalne magnitude za određenu razinu punjenja (vidi

Prilog E). Inače, smatra se da je najnepovoljniji slučaj opterećenja nekog konstrukcijskog elementa, onaj koji ima najveći tlak i najkraće vrijeme porasta.

Za vrijeme simulacije zapljuskivanja dolazi do velikih brzina fluida zbog gibanja tanka, što zahtijeva manje vremenske korake od vremenskih intervala Δt da bi se zadovoljili uvjeti rješavanja algoritma. Program „SDA Fluids“, koristi opciju samopodešavanja, gdje je broj vremenskih ciklusa kroz vremenski interval Δt (simulacijski ciklus) obično veći od 1, a najčešće oko 10. To se ne odnosi na slučajeve u kojima se raspodjelu tlaka promatra kao cjelinu, ali korisnik vrlo često koristi samo vršne vrijednosti, ne uzimajući u obzir značajke impulsa tlaka. To bi kao posljedicu moglo imati pogrešnu interpretaciju rezultata, tj. vrlo veliki tlakovi koji se pojavljuju kroz vrlo male vremenske intervale predstavljaju se kao „prosječni“ tlakovi kroz traženi interval Δt . Da bi se riješio ovaj problem dobivanja pretjerano velikih vrijednosti tlakova, zamišljena je shema prosječnog vremena pulziranja tlaka koja daje „realističnije“ sudarne tlakove.



Slika 7.78. Vremenski prikaz sheme prosječnog pulziranja tlaka [19]

Istovremeni tlakovi, koji su direktno rješenje algoritma, zamijenjeni su prosječnim tlakom kroz jedan vremenski korak. Kada se kaže prosječni tlak, misli se na tlak izračunat ovim postupkom, i upravo taj tlak koristi se za proračun strukturne izdržljivosti konstrukcije. Pod nekim okolnostima, zbog malih brzina fluida rješenje će konvergirati za referentni vremenski korak (bez njegova smanjivanja). Zbog vjerodostojnosti sheme prosječnog pulziranja tlaka, program „SDA Fluids“ radi po principu da je potrebno izračunati minimalno četiri primjera kroz pojedini vremenski korak da bi se došlo do prosječne sheme.

Kako su tlakovi koji su određeni programom „SDA Fluids“ u svojoj prirodi dinamički, a proračun odziva konstrukcije, prema postupku razvijenom u klasifikacijskom društvu Lloyd's Register, počiva na kvazi–statičkoj analizi, potrebno je dinamičke tlakove preinačiti u ekvivalentne statičke tlakove. Takva konverzija potrebna je kada je vremenski prikaz opterećenja takav da je sudarni period blizak prirodnom periodu opterećene strukturne komponente [19]. U tom slučaju ekvivalentni statički tlakovi mogu imati i dvaput veću vrijednost od dinamičkih tlakova.

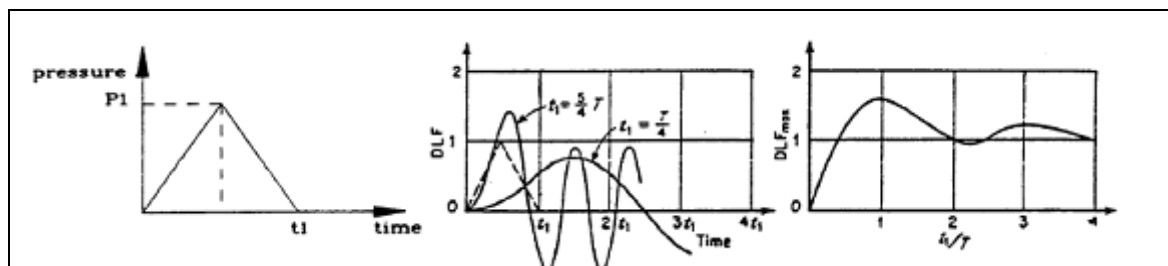
Da bi se utvrdilo je li potrebno izvršiti konverziju dinamičkih tlakova u statičke, može se poslužiti uputama prikazanim u [19], koje navode sljedeće:

- Ako je faktor sigurnosti dobiven analizom plastičnog sloma („SDA Ultimate Strength 10604“) veći ili jednak 2, nije potrebna nikakva transformacija tlakova.
- Ako se impuls sudarnog tlaka može približno prikazati trokutastim pulziranjem tlaka u trajanju od t_1 , kako prikazuje Slika 7.79., sudarni tlak se može smatrati kvazi–statičkim ukoliko vrijedi $t_1/T > 2$, gdje je T prirodni

period strukturne komponente. Općenito, ovaj pristup se može primijeniti za uobičajene strukture podvrgnute tlakovima od zapljuskivanja.

- Ukoliko nijedan od gornjih uvjeta nije zadovoljen, ponekad se može zahtijevati konverzija dinamičkih tlakova u statičke.

Ovisnost faktora dinamičkog opterećenja (DLF) o prirodnom periodu (frekvenciji) strukturne komponente, podvrgnute dinamičkom opterećenju trokutastog oblika prikazana je na sljedećoj slici:



Slika 7.79. Faktor dinamičkog opterećenja za trokutasto impulsno opterećenje [19]

Na kraju, jasno je da se na temelju rezultata sa stranice 71 ne može donositi zaključak o tome koja je razina punjenja kritična po pitanju strukturne izdržljivosti, tim više što je osim vremenske distribucije zanemareno i mjesto na kojem se pojedini impuls pojavljuje. Prethodna tvrdnja potvrđuje tezu da samo analiza strukturnog odziva nudi odgovor na pitanje o prihvatljivosti pojedine razine punjenja tanka tijekom plovidbe.

8. PROVJERA STRUKTURNE IZDRŽLJIVOSTI

Ovo poglavlje odnosi se na provjeru izdržljivosti strukturnih elemenata središnjeg tanka tankera STENA PARIS (vidi Prilog A) u uvjetima zapljuskivanja pri ljuljanju broda. Općenito, za tankere za prijevoz nafte klasifikacijska društva ne zahtijevaju proračune ovog tipa, pa je radi cjelovitosti rada i njegova preglednog karaktera s jedne, i težnje za sažetošću i jasnoćom izričaja s druge strane, proračun proveden samo za strukturu boka i palube (korugirana pregrada i pokrov dvodna izostavljeni su iz razmatranja). Za određivanje izdržljivosti pojedinih panela korišten je program „SDA Ultimate Strength“.

8.1. Teorijske osnove

Odziv konstrukcije podvrgnute dinamičkim opterećenjima može biti prilično složen. Treba voditi računa o tome da je u složenim strukturama moguća i izvjesna sprega između strukturnih komponenata. U takvim slučajevima analitičar mora sam odlučiti hoće li se različite komponente tanka analizirati posebno ili je potrebno koristiti model s više stupnjeva slobode. Ako svaku komponentu tanka treba analizirati pojedinačno, obično se pretpostavljaju kruti oslonci za svaki element (zanemarujući pomake u osloncima). Također se pretpostavlja da se sile inducirane zapljuskivanjem prenose neizobličene s jednog elementa na drugi. Često se odziv umanjuje uslijed utjecaja sprege, ali se nekada može i povećati. U klasifikacijskom društvu Lloyd's Register razvijena je jednostavna metoda proračuna odziva za elastično–plastično ponašanje stjenki tanka koja se zasniva na ekvivalentnom sistemu s jednim stupnjem slobode, određenom iz principa energije. Pretvaranje podataka dinamičkog tlaka u statički za proračun konstrukcije, prema [19] zasniva se na sljedećim tvrdnjama:

- rješenje za plastično ponašanje se može zasnivati na faktoru dinamičkog opterećenja (DLF) koji je funkcija vremenskog prikaza opterećenja i prirodnog perioda konstrukcije,
- množenjem faktora dinamičkog opterećenja (DLF) s nekom ekstremnom vrijednošću tlaka, dobije se ekvivalentni statički tlak koji se može koristiti kod projektiranja konstrukcije,
- za plastično ponašanje struktura, podvrgnutih opterećenjima, dugotrajnim u odnosu na prirodni period konstrukcije, ekvivalentni tlak predstavlja dobru pretpostavku maksimalnih smičnih sila u konstrukciji.

Projektni tlak, koji služi za proračun izdržljivosti konstrukcije, može se dobiti prema sljedećem izrazu:

$$P_{st} = P_{din} \cdot DLF \quad (8.1)$$

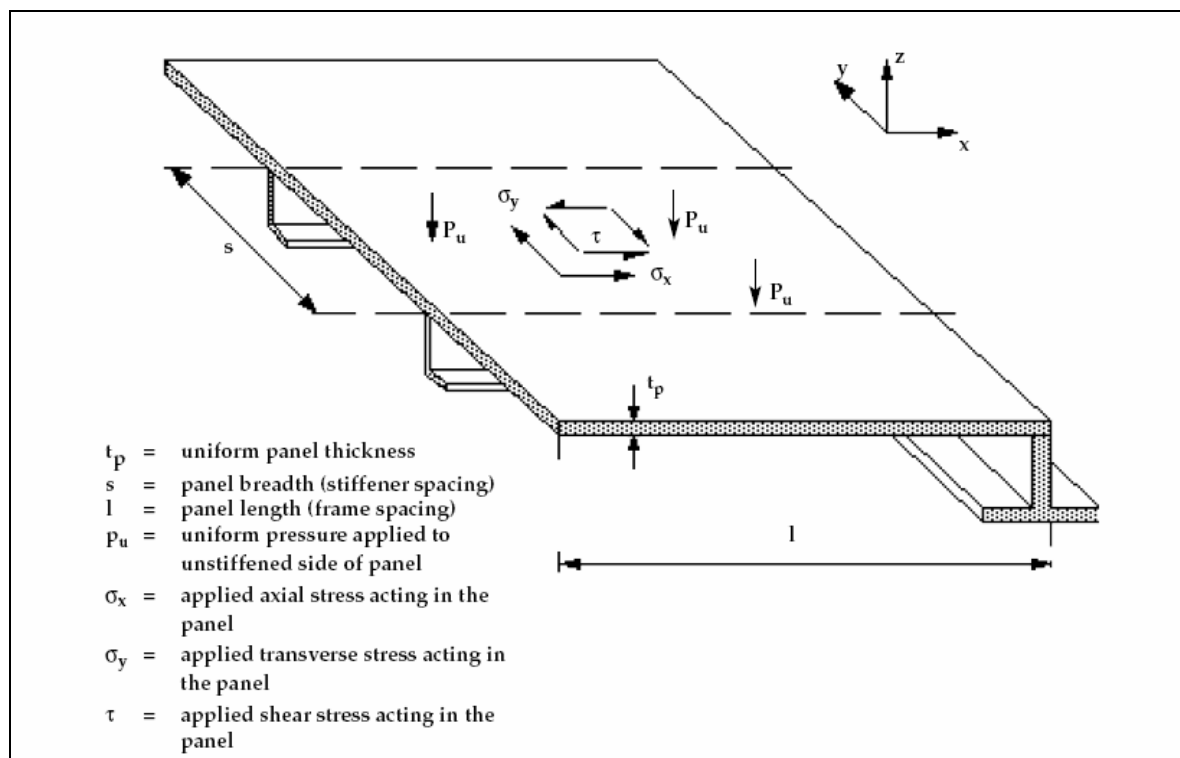
Za određivanje projektnih tlakova potrebno je uzeti u obzir i odziv konstrukcijskih elemenata, a tvrdnjama navedenim u prethodnim poglavljima koje govore o važnosti vremenske distribucije tlaka (nije samo važan maksimalni iznos tlaka) treba dodati i činjenicu, da visok tlak ne mora predstavljati problem u pogledu čvrstoće, ukoliko je površina na kojoj djeluje, mala. Kao najmanja jedinična površina, obično se uzima površina polja panela obrubljenog ukrepama. Opterećenje

plastičnog sloma koristi se u mnogim slučajevima za ukazivanje na čvrstoću, zajedničku opločnju i ukrepama, uzimajući u obzir njihove moguće načine sloma. Primjerice, čvrstoća panela ukrepljenog kombinacijom primarnih i sekundarnih elemenata postiže se kao opterećenje za koje se zahtijeva formiranje plastičnog zgloba u obliku zgiba. Komponentama opterećenja uslijed zapljuskivanja potrebno je, na prikladan način, dodati globalna naprezanja od savijanja trupa za vijek trajanja konstrukcije.

Za provedbu proračuna programom „SDA Ultimate Strength“ potrebne su sljedeće informacije:

- tip stjenke,
- smjer ukrepljenja,
- svojstva materijala,
- ovojnica tlakova,
- debljina ravnih panela,
- razmak, raspon i dimenzije ukrepa.

Program obrađuje pojedinačne ukrepe i širinu panela između promatrane i sljedeće ukrepe, ili kuta tanka. Duljina panela uzima se kao udaljenost između rebra.



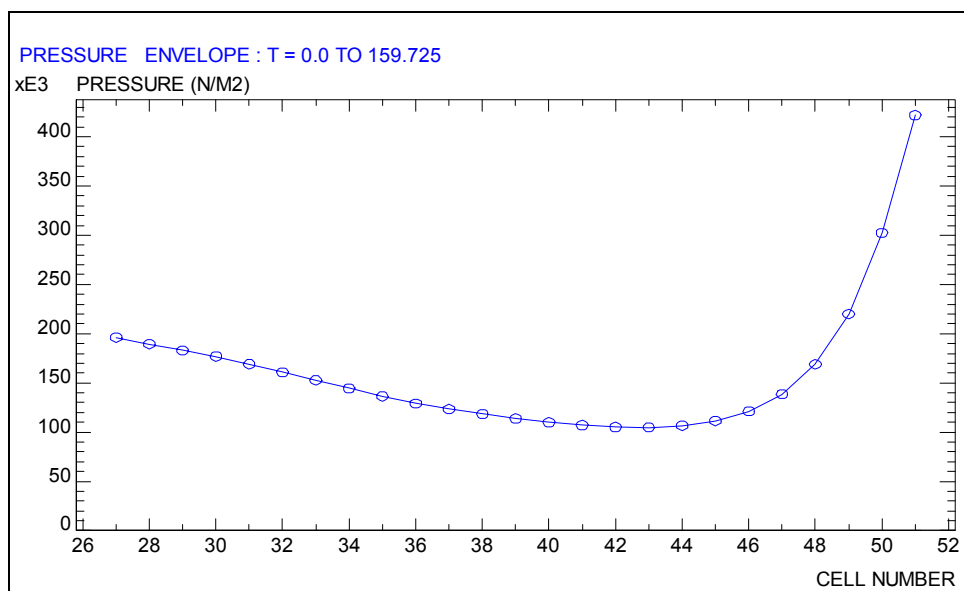
Slika 8.1. Geometrija panela [19]

Ukrepe se smatraju djelotvorno poduprtima na svakoj rebrenici ili nosaču. Kada se koriste koljena, kako bi se smanjila efektivna duljina ukrepe, pretpostavlja se da su ona postavljena simetrično na obje strane mreže primarnih elemenata, te da su odgovarajuće ukrepljena. Što se tiče oblika panela, dopuštene su male početne nesavršenosti, kao i trajne deformacije. Takve nesavršenosti u programu se definiraju pomoću određenog razmaka ukrepa i mjere s pozitivnim predznakom, gledano prema ukrepi, odnosno s negativnim gledano od ukrepe. Program na izlaznoj listi ispisuje sve ulazne podatke i izračunate tlakove plastičnog sloma za ravne panele i ukrepe, kao i faktore sigurnosti protiv sloma.

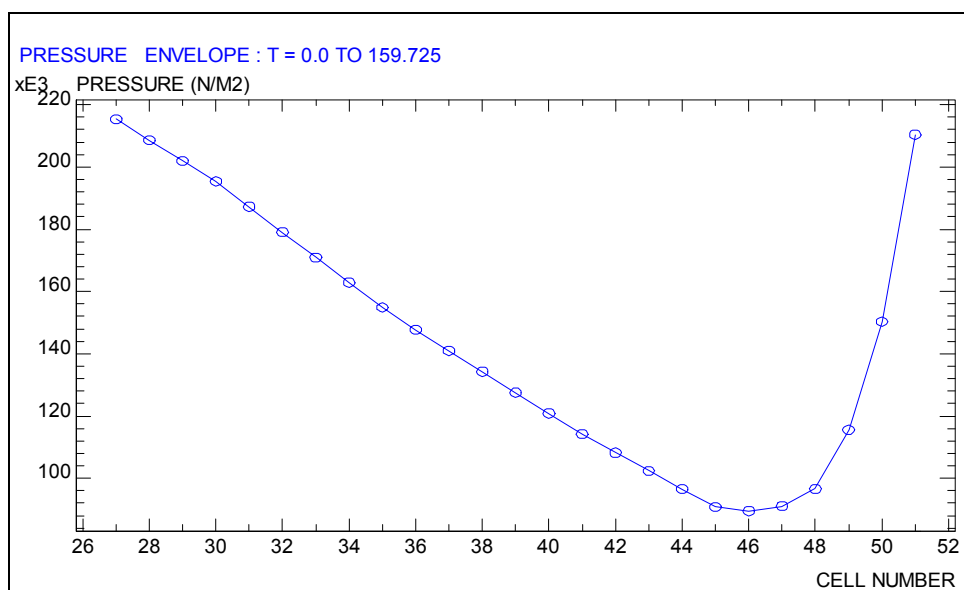
8.2. Provjera izdržljivosti pojedinih panela središnjeg tanka

Za panele boka i panela palube programom „SDA Ultimate Strength“ određen je tlak plastičnog sloma koji je uspoređen s tlakovima uslijed zapljuskivanja za punjenja od 75% i 90%, koji su izračunati programom „SDA Fluids“ i opisani u prethodnom poglavlju. Rezultati su prikazani samo za opločenja panela. Dinamički faktor nije uziman u obzir (zapravo je za ovaj slučaj jednak jedinici), jer je za njegovo određivanje potrebno izvršiti dinamičku analizu ukrepljenih panela koja bi rezultirala određivanjem njihove prirodne frekvencije (perioda). Tek bi usporedba prirodnog perioda ukrepljenog panela s periodom (trajanjem) uzbude ponudila informaciju koliki dinamički faktor treba biti (maksimalna vrijednost mu je 2, vidi Sliku 7.79.). Ulazne i izlazne liste programa „SDA Ultimate Strength“ prikazane su u Prilogu F.

8.2.1. Provjera izdržljivosti panela boka



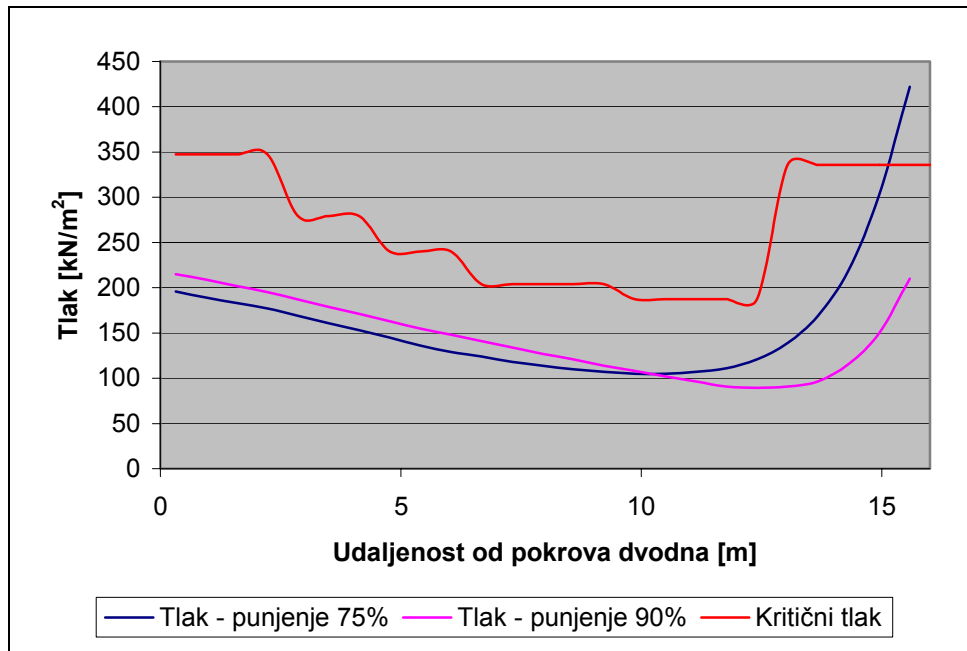
Slika 8.2. Ovojnica tlaka za ćelije na boku – punjenje 75%



Slika 8.3. Ovojnica tlaka za ćelije na boku – punjenje 90%

Tablica 8.1. Tlak uslijed zapljuskivanja na bok tanka

Ćelija	Udaljenost od pokrova dvodna	Tlak [kN/m ²] punjenje – 75%	Tlak [kN/m ²] punjenje – 90%
27	0,318	196	215
28	0,954	189	209
29	1,590	183	202
30	2,226	177	195
31	2,862	169	187
32	3,498	161	179
33	4,134	153	171
34	4,770	145	163
35	5,406	136	155
36	6,042	129	148
37	6,678	124	141
38	7,314	118	134
39	7,950	114	127
40	8,586	110	121
41	9,222	107	114
42	9,858	105	108
43	10,494	105	102
44	11,130	107	96,5
45	11,766	111	90,8
46	12,402	121	89,4
47	13,038	139	91
48	13,674	169	96,6
49	14,310	220	116
50	14,946	303	150
51	15,582	422	210



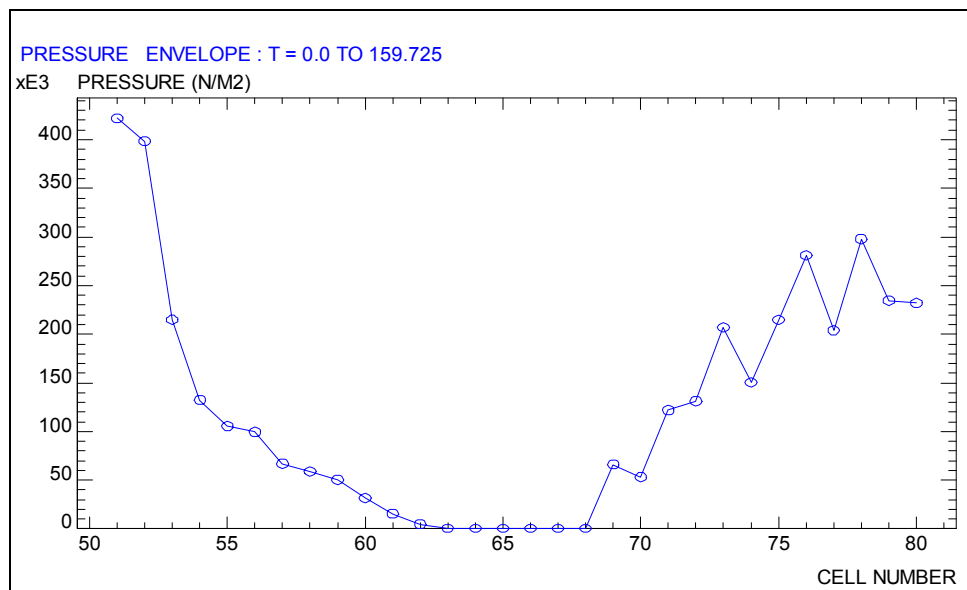
Slika 8.4. Usporedba tlakova od zapljuskivanja boka s kritičnim tlakom

Slike 8.2. i 8.3. pokazuju ovojnice zapljuskivanja za razine punjenja od 75% i 90%, koje su zapravo ovojnice sa Slika 7.39. i 7.40., odnosno jedan njihov dio koji se odnosi na ćelije boka (numeracija ćelija može se provjeriti na Slici 7.12.). Te vrijednosti tlaka dane su u Tablici 8.1. i na temelju njih je nacrtan dijagram na Slici 8.4. Crvena krivulja na Slici 8.4. predstavlja tlak sloma opločenja ukrepljenih panela (kritični tlak) određen programom „SDA Ultimate Strength“, čije se vrijednosti mogu

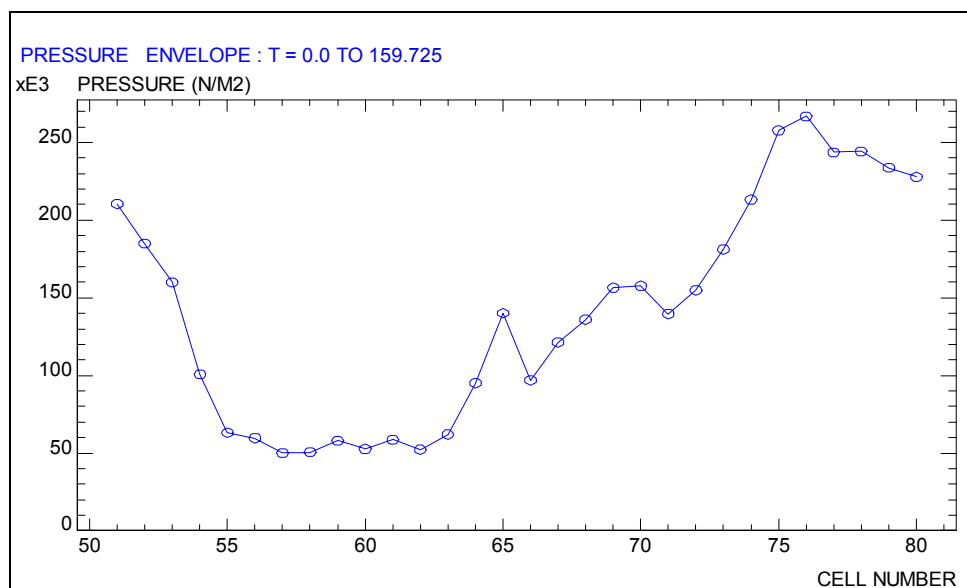
očitati na izlaznoj listi prikazanoj u Prilogu F. Vidljivo je da je tlak sloma uglavnom veći od tlaka zapljuskivanja, osim u blizini spoja boka i palube (za dinamički faktor jednak jedinici). Za taj dio tanka prikladno je napraviti pojačanja u vidu podebljanja opločenja panela ili smanjivanja razmaka uzdužnjaka.

8.2.2. Provjera izdržljivosti panela palube

Za panele palube proveden je postupak analogan postupku u prethodnoj točki. I ovdje se može uočiti potreba za pojačanjem strukturnih dijelova u blizini spoja palube i boka (Slika 8.7.). Pojačanja se također predlažu za dijelove palube u blizini sredine broda. Rezultati proračuna tlaka sloma za panele palube također su prikazani kao dio izlazne liste u Prilogu F.



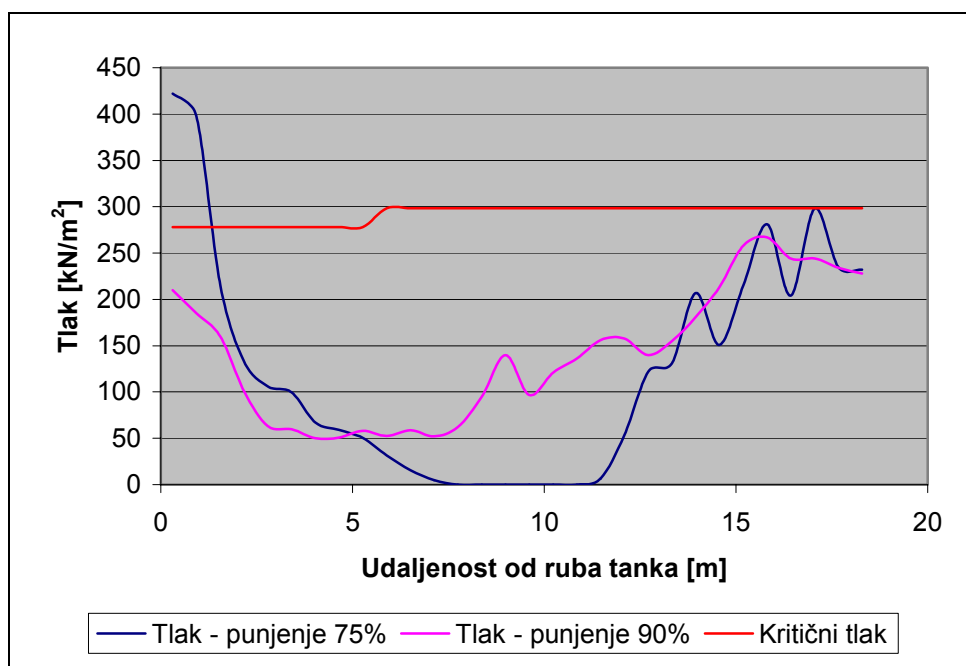
Slika 8.5. Ovojnica tlaka za ćelije na pokrovu tanka – punjenje 75%



Slika 8.6. Ovojnica tlaka za ćelije na pokrovu tanka – punjenje 90%

Tablica 8.2. Tlak uslijed zapljuskivanja na pokrov tanka

Ćelija	Udaljenost od ruba tanka	Tlak [kN/m ²] punjenje – 75%	Tlak [kN/m ²] punjenje – 90%
51	0,31	422	210
52	0,93	398	185
53	1,55	215	160
54	2,17	133	101
55	2,79	106	63,1
56	3,41	99,6	59,7
57	4,03	66,9	50,1
58	4,65	58,9	50,6
59	5,27	50,3	58
60	5,89	31,6	52,6
61	6,51	15,5	58,6
62	7,13	4,87	52,2
63	7,75	0	62
64	8,37	0	95
65	8,99	0	140
66	9,61	0	96,8
67	10,23	0	121
68	10,85	0	136
69	11,47	6,6	156
70	12,09	53,2	158
71	12,71	122	140
72	13,33	131	155
73	13,95	207	181
74	14,57	151	213
75	15,19	215	258
76	15,81	281	267
77	16,43	204	244
78	17,05	298	244
79	17,67	235	234
80	18,29	232	228



Slika 8.7. Usporedba tlakova od zapljuskivanja palube s kritičnim tlakom

8.3. Kratak osvrt na rezultate proračuna

Problem prijenosa hidrodinamičkih opterećenja na strukturu iznimno je složen, a u razmatranom slučaju uspoređene su maksimalne vrijednosti tlaka direktno iz proračuna zapljuskivanja s kritičnim tlakovima, određenim na temelju pretpostavke statičkog opterećenja pa rezultati dobiveni u točki 8.2. imaju samo orijentacijski karakter. Veću pažnju trebalo bi posvetiti određivanju dinamičkog faktora kojim bi se trebali pomnožiti iznosi dinamičkog tlaka, s kojim bi se moglo računati kao kvazi-statičkim (izraz (8.1)). Ipak, prema sličnoj analizi prikazanoj u [19], ali i prema Slici 7.79. vidljivo je da se vrijednosti dinamičkog faktora neće „puno“ razlikovati od jedinice, pa i ovakvi rezultati daju dobru sliku koji dijelovi strukture tanka su najkritičniji po pitanju oštećenja uslijed zapljuskivanja.

9. ZAKLJUČAK

9.1. Zaključna razmatranja diplomskog rada

U ovom diplomskom radu obrađen je fenomen zapljuskivanja u djelomično ispunjenim tankova, za čiji opis suvremena brodograđevna teorija još nije ponudila potpuno prihvatljive matematičke modele, a time i njihova rješenja. Problem opisa zapljuskivanja složen je jer se sastoji od niza problema nižeg reda, koji su sami za sebe, uz današnji stupanj ukupnog matematičkog znanja i hardverskog razvoja, praktički nerješivi u prihvatljivom vremenu.

Primjerice, opis gibanja fluida pod djelovanjem harmonijske (pravilne) uzbude zahtijeva vrlo složen matematički model, koji se rješava korištenjem diskretizacijskih numeričkih metoda, koje su u svojoj suštini približne, ali za inženjerske potrebe dovoljno točne. Kada se takvom gibanju fluida doda pojava faznih pretvorbi, kakva je česta kod ukapljenog prirodnog plina i eventualne pojave lokalnog temperaturnog gradijenta očito je da se matematički model dodatno komplicira. Opis udarno (impulsno) opterećenih struktura dovoljno je složen sam za sebe (primjerice sudar dviju elastičnih greda), pa složenost sudara tekućine i elastične strukture ne treba detaljnije obrazlagati (vidi 3.3.). Kompletiranje znanja o problemu zapljuskivanja zahtijeva i jasnu matematičku vezu između zapljuskivanja i ponašanja broda na valovima. Gibanje fluida u brodskim tankovima pod djelovanjem pravilne uzbude je zapravo idealizacija i praktički se nikada ne javlja, pa kada se svemu navedenom pridoda slučajna priroda morskih valova, koji su zapravo uzbuda koja zapljuskivanje uzrokuje, jasno je da je problem zapljuskivanja daleko od točnog rješenja. Dosadašnji rad istraživačkih instituta, sveučilišta i klasifikacijskih društava, ukratko svih subjekata koji se bave ovom problematikom, rezultirao je dovoljno dobrim modelima za globalni opis zapljuskivanja, ali što se događa lokalno, s dovoljnom sigurnošću još nitko ne može reći.

U ovom radu, njegovan je tzv. „*ab ovo*“ pristup problemu zapljuskivanja uz nastojanje da rad ima edukativan karakter. Razlozi za takav pristup su u nepostojanju literature s ovog područja na hrvatskom jeziku, te u stavu autora da se izučavanju složenog problema kao što je zapljuskivanje, može pristupiti samo ukoliko se razvije dobra podloga u vidu fundamentalnih znanja i ukoliko istraživač ima pregled svih čimbenika koji zapljuskivanje determiniraju. Jasno je, da je potrebno usvojiti i znanja vodećih institucija koje se bave izučavanjem zapljuskivanja, pa je u radu posebna pažnja posvećena tom aspektu.

U radu je, dakle, objašnjen pojam zapljuskivanja zajedno s osnovnim načinima gibanja fluida prilikom zapljuskivanja u ovisnosti o ispunjenosti tanka i prirodi vanjske uzbude. Pojašnjeno je gdje se u praksi problem zapljuskivanja može susresti, te kakva je suvremena praksa u njegovu rješavanju. Napravljen je osvrt na pravila klasifikacijskih društava, imajući na umu njihovu važnost za brodograđevnu praksu. Navedeni su definicijski izrazi za veze između naprezanja i deformacija za materijale od kojih se gradi struktura suvremenih brodskih tankova. Objašnjena je numerička metoda za proračun zapljuskivanja kao i način rada korištenih programa. Proveden je proračun zapljuskivanja kojim su određena opterećenja razmatranih tankova, te je provjerena izdržljivost određenih strukturnih elemenata jednog tanka, prema postupku razvijenom u klasifikacijskom društvu Lloyd's Register.

Proračun zapljuskivanja, proveden u ovom radu, pokazao je da je vrlo teško predvidjeti koja bi razina punjenja mogla biti kritična za strukturu. Za različitu razinu punjenja, različiti su mnogi čimbenici; odziv broda na valovima ovisan je o njegovoj

masi pa je uzbuda za različitu razinu punjenja različita, način gibanja fluida ovisan je o odnosu frekvencije njihanja broda i prirodne frekvencije fluida (koja je također ovisna o punjenju), o načinu gibanja fluida u tanku ovisno je trajanje sudara fluida i stjenke, o punjenju tanka je ovisno prigušenje, itd. Na temelju prethodno napisanog, jasno je da za neke razine punjenja samo provedbe numeričkih proračuna nude odgovor na pitanje kolika će se opterećenja javiti na strukturnim elementima tanka, ali i rezultati takvih proračuna, nažalost samo su orijentacijskog karaktera, jer praktički je nemoguće točno izračunati vršnu vrijednost tlaka, a time i njegovu točnu distribuciju u vremenu. Treba još jednom napomenuti da se opterećenja uslijed zapljuskivanja vrlo djelotvorno smanjuju ugrađivanjem pljuskača (ili neke druge unutarnje strukture koja ometa slobodan tijek fluida), ali i da brodovlasnici imaju svojevrsan otpor prema takvim rješenjima, kako zbog početne cijene, tako i zbog čišćenja tanka.

9.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Prilično je teško dati jednostavan odgovor na pitanje u kojem smjeru se trebaju kretati daljnja istraživanja, za tako složen problem kao što je zapljuskivanje. Jasno je da samom zapljuskivanju kao objektu istraživanja nije poželjno pristupiti individualno i jednosmjerno, zbog njegove interdisciplinarnosti, već je potrebno koristiti znanja vezana za hidrodinamiku u širem smislu, CFD, znanja o čvrstoći (statičkoj i dinamičkoj) i materijalima, eksperimentalnim tehnikama, instrumentaciji u naravi i sl. Pritom je potrebno kombinirati teorijska promišljanja i eksperimentalna istraživanja. Valjanost rezultata bilo kojeg proračuna ovisna je o tome koliko dobro proračunski model opisuje stvarnu pojavu. Stoga, jasno je da bi potpuno točan proračun zapljuskivanja zahtijevao uzimanje u obzir svih čimbenika, koji na zapljuskivanje utječu, kao i načina na koji utječu. Budući da je takav model još uvijek nemoguće naćiniti, potrebno je analizirati utjecaj pojedinih ćimbenika na zapljuskivanje i truditi se uzeti u obzir one, ćiji je utjecaj ocijenjen dominantnim.

Oćito je da bi znanstvena istraživanja zapljuskivanja, nekad u budućnosti trebala rezultirati jednostavnijim matematićkim aparatom kojim će biti moguće toćno i brzo procijeniti dimenzije strukturnih elemenata tankova odobrenih za djelomićno punjenje, kako bi se zadovoljio kriterij izdrćljivosti konstrukcije uz što manju cijenu.

Na kraju, ne treba posebno isticati potrebu za daljnjim proućavanjem fenomena zapljuskivanja jer je ona i intuitivno jasna, kako u gospodarskom smislu, tako i iz perspektive znanosti, koja je u svojoj prirodi radoznala i kojoj *spiritus movens* u vidu ekonomskih ostvarenja nije uvijek nućan.

Dakle, potrebno je jedan dio ljudske aktivnosti i radoznalosti usmjeriti na daljnje proućavanje problema zapljuskivanja, u cilju razvijanja matematićkih modela i postupaka za njihovo rješavanje, kojima ćemo s dovoljnom toćnošću i u, s inćenjerskog stajališta, prihvatljivom vremenu odrediti uvjete pod kojima se zapljuskivanje javlja, te njegove popratne ućinke, a sve to neovisno o vrsti i obliku tanka, vrsti fluida, namjeni broda i sl., jer na poslijetku, ploviti se mora, zar ne?

10. LITERATURA

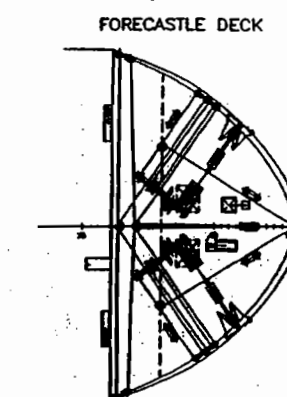
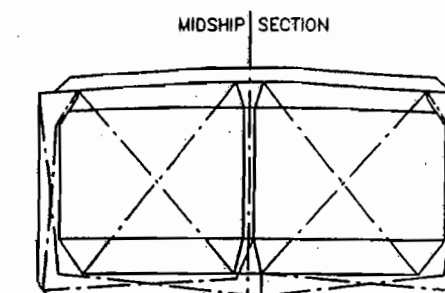
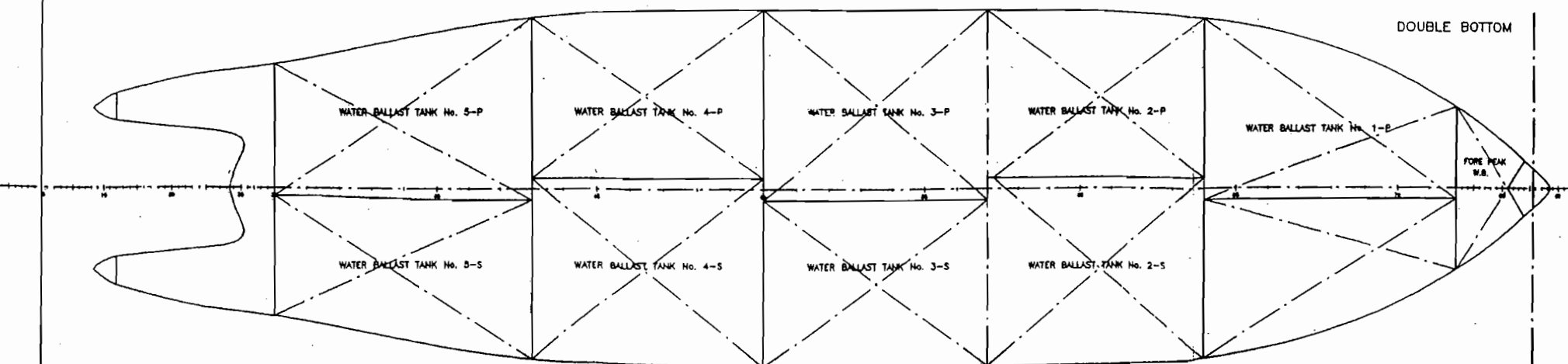
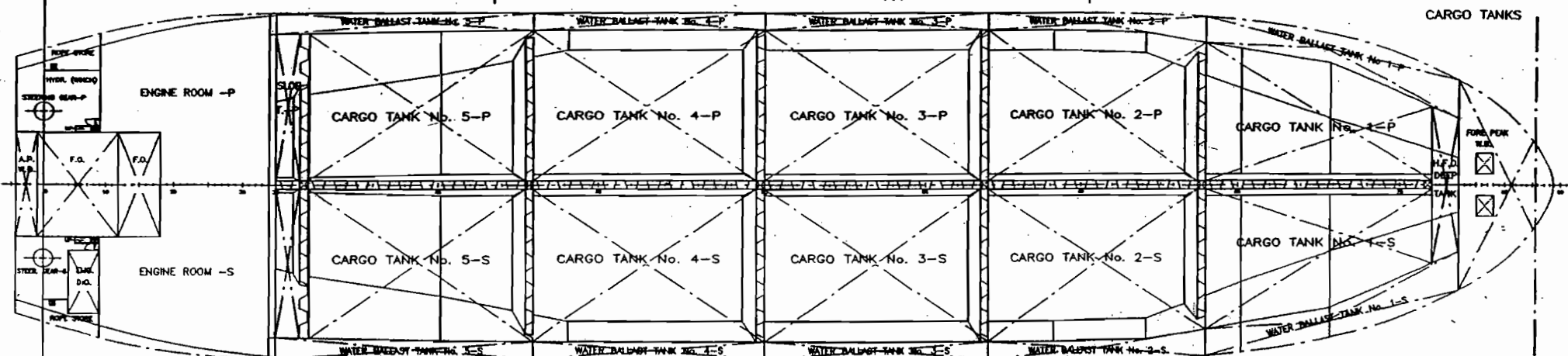
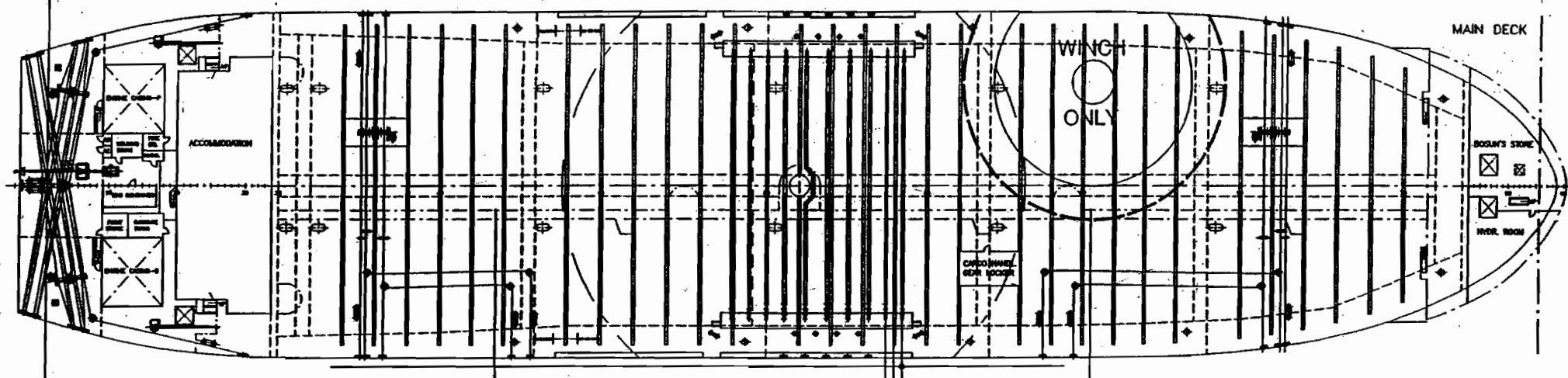
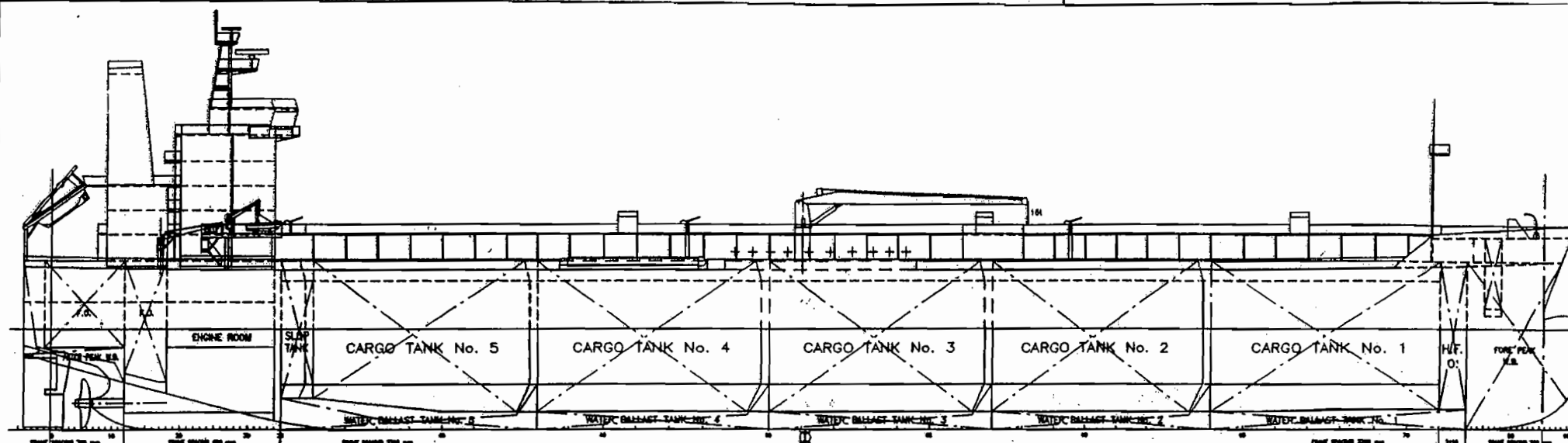
- [1] Prpić–Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovnih objekata, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2006.
- [2] Zalar, M., Malenica, Š., Diebold, L.: Selected hydrodynamic issues in design of large LNG carriers, RINA ICSOT Conference, Busan, Korea, 2006.
- [3] HAZU: Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures (by O. M. Faltinsen), Bilten Razreda za tehničke znanosti, god. 9, br. 3, Zagreb, 2007.
- [4] Nam, B. W., Kim, Y.: Effects of sloshing on the motion response of LNG–FPSO in waves, 22nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Plitvice, Croatia, 2007.
- [5] Zalar, M., Diebold, L., Baudin, E., Henry, J., Chen, X. B.: Sloshing effects accounting for dynamic coupling between vessel and tank liquid motion, 26th OMAE Conference, San Diego, California, USA, 2007.
- [6] LR: ShipRight – Structural design assessment procedure – Sloshing loads and scantling assessment, Lloyd's Register of Shipping, London, UK, 1994.
- [7] Šošić, M.: Određivanje opterećenja u brodskim tankovima, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1999.
- [8] Zalar, M., Cambos, P., Besse, P., Le Gallo, B., Mravak, Z.: Partial fillings of membrane type LNG carriers, 21st GASTECH, Bilbao, Spain, 2005.
- [9] DNV: A study of dynamic loads caused by liquid sloshing in LNG tanks – Technical investigation (Report no. 74–276–C), Det Norske Veritas, Oslo, Norway, 1974.
- [10] Zalar, M., Malenica, Š., Mravak, Z., Moirod, N.: Some aspects of direct calculation methods for the assessment of LNG tank structure under sloshing impacts, neobjavljeno
- [11] <http://www.sintef.no>
- [12] <http://www.flow3d.com>
- [13] ABS: Strength assessment of membrane–type LNG containment systems under sloshing loads – Guidance notes, American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2006.
- [14] DNV: Common structural rules for double hull oil tankers with length 150 m and above, Det Norske Veritas, Oslo, Norway, 2006.
- [15] LR: Classification and certification of floating offshore liquefied gas installations – Guidance notes, Lloyd's Register of Shipping, London, UK, 2004.

- [16] <http://www.emsa.europa.eu>
- [17] Alfirević, I.: Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma, Sveučilište u Zagrebu, Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [18] <http://www.concordia-maritime.se>
- [19] LR: ShipRight – Structural design assessment – Sloshing loads and scantling assessment, Lloyd's Register of Shipping, London, UK, 2004.
- [20] --- LR.FLUIDS – Theoretical Manual, TPDD Report 90/01, Lloyd's Register
- [21] http://powerlab.fsb.hr/inm/zakoni_ocuvanja.htm

PRILOZI

Prilog A

Opći plan analiziranog broda i presjek na glavnom rebru



OIL PRODUCT TANKER 65200 DWT

PRINCIPAL DIMENSIONS

LENGTH OVERALL	182.90 m
LENGTH BETWEEN PERP	175.50 m
BREADTH, MLD	40.00 m
DEPTH, MLD	17.90 m
DRAUGHT, DESIGN	11.30 m
DRAUGHT, SCANTLING	13.00 m
DEADWEIGHT AT DESIGN DRAUGHT	54200 t
DEADWEIGHT AT SCANTLING DRAUGHT	65200 t

INDEX	DATE	NAME	SIGNATURE	DESCRIPTION	DATE	SIGN.
DESIGNED BY	02.2003	A. BORZIC	[Signature]	BRODOSPLIT - BRODOGRADISTE, d.d.		
CHECKED BY	02.2003	[Signature]	[Signature]	SPLIT		
HEAD OF DEPT.				HRVATSKA		
SCALE:	1:300			PROJECT No. 995	DEPT. 1322	
				GENERAL ARRANGEMENT PRELIMINARY	DRAW. No. 01-101-201	
					REG. No. 254201	

[illegible]

Prilog B

Ulazne i izlazne liste programa „SDA Tank Assessment“

**- Lloyd's Register -
Tank Sloshing Assessment
9-10-2007**

SHIP DATA

Ship Length, LPP = 175.500 m
Ship Moulded Breadth = 40.000 m
Ship Moulded Depth = 17.900 m
Service Speed = 14.500 knots

Ship's motion = Rolling and Pitching
Radius of Gyration for roll = 13.600 m

Loading conditions: Unspecified

Ballast

Displacement = 42630.00 tonnes
Block Coefficient = 0.78160
Mean Draught = 7.580 m
Transverse Metacentric Height = 12.650 m

Loaded

Displacement = 78500.00 tonnes
Block Coefficient = 0.83920
Mean Draught = 13.000 m
Transverse Metacentric Height = 5.020 m

TANK DATA

Tank Name = Sredisnji
Tank Length = 25.900 m
Tank Breadth = 18.600 m
Tank Depth = 15.900 m
VCG of ship from Baseline = 8.950 m
Height of Inner Bottom = 2.000 m
LCG of ship from Midship = 0.000 m
Centre of Tank from Midship = 8.600 m
Centre of Tank from Centreline = 9.300 m
Density of Liquid = 920.000 kg/m³
No Internal Stiffening

Filling Number	Filling Level %
1	15.0
2	30.0
3	45.0
4	60.0
5	75.0
6	90.0
7	99.0

CALCULATED RESULTS: ROLL ASSESSMENT

Ships Natural Rolling Period:
Ballast = 8.986 sec
Loaded = 14.264 sec
Maximum 'Lifetime' Roll Angle = 20.727 deg
Maximum 'Lifetime' Heave Amplitude = 4.000 m
Maximum 'Lifetime' Sway Amplitude = 2.500 m
Maximum 'Lifetime' Vertical Acceleration = 4.168 m/s²

Lower Bound of Critical fill range = 2.39 %
 Upper Bound of Critical fill range = 100.00 %

Filling Level %	Natural Period (s)	Min Separation	Assessment Level
15.0	7.89	1.09	2
30.0	5.98	3.01	2
45.0	5.34	3.65	2
60.0	5.08	3.91	2
75.0	4.97	4.02	2
90.0	4.92	4.07	2
99.0	4.91	4.08	0

Level 2 Sloshing Pressure determination

Tank (%)	Depth m	Pressure (kN/m2) at Filling Levels:
		15.0
95.0	15.1	0.0
90.0	14.3	0.0
85.0	13.5	0.0
80.0	12.7	0.0
75.0	11.9	0.0
70.0	11.1	0.0
65.0	10.3	0.0
60.0	9.5	0.0
55.0	8.7	169.3
50.0	7.9	179.5
45.0	7.2	189.7
40.0	6.4	200.0
35.0	5.6	210.2
30.0	4.8	220.4
25.0	4.0	230.6
20.0	3.2	240.8
15.0	2.4	251.1
10.0	1.6	261.3
5.0	0.8	271.5

* INFORMATION * LEVEL 2 CALCULATIONS ABANDONED DUE TO IMPACT ON TANK CEILING

LR.FLUIDS DATA WILL BE GENERATED FOR LEVEL 3 CALCULATIONS FOR THE REMAINING FILLING LEVELS

Level 3 Sloshing Pressure determination

FILLING LEVEL	FILE NAME
15.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_15.LFL
30.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_30.LFL
45.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_45.LFL
60.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_60.LFL
75.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_75.LFL
90.00	Slosh_Sredisnji_ROLL_90.LFL

FILES APPENDED TO SredisnjiMULTIJOB.LFL

CALCULATED RESULTS: PITCH ASSESSMENT

Ships Natural Pitching Period:

Ballast =8.519 sec

Loaded =11.560 sec

Maximum 'Lifetime' Pitch Angle =10.388 deg

Maximum 'Lifetime' Heave Amplitude =4.000 m

Maximum 'Lifetime' Vertical Acceleration =4.168 m/s²

Lower Bound of Critical fill range = 0.00 %

Upper Bound of Critical fill range = 100.00 %

Filling Level %	Natural Period (s)	Min Separation	Assessment Level
15.0	10.86	0.70	2
30.0	7.98	0.54	2
45.0	6.88	1.64	2
60.0	6.36	2.16	2
75.0	6.09	2.43	2
90.0	5.94	2.58	2
99.0	5.89	2.63	0

Level 2 Sloshing Pressure determination

Tank (%) Depth m Pressure (kN/m2) at Filling Levels:

		15.0	30.0
95.0	15.1	0.0	0.0
90.0	14.3	0.0	123.0
85.0	13.5	0.0	123.1
80.0	12.7	0.0	124.1
75.0	11.9	0.0	126.0
70.0	11.1	0.0	128.7
65.0	10.3	0.0	132.2
60.0	9.5	0.0	136.4
55.0	8.7	0.0	188.2
50.0	7.9	0.0	198.4
45.0	7.2	0.0	208.6
40.0	6.4	151.0	218.9
35.0	5.6	161.3	229.1
30.0	4.8	171.5	239.3
25.0	4.0	181.7	249.5
20.0	3.2	191.9	259.7
15.0	2.4	202.2	270.0
10.0	1.6	212.4	280.2
5.0	0.8	222.6	290.4

* INFORMATION * LEVEL 2 CALCULATIONS ABANDONED DUE TO IMPACT ON TANK CEILING

LR.FLUIDS DATA WILL BE GENERATED FOR LEVEL 3 CALCULATIONS FOR THE REMAINING FILLING LEVELS

Level 3 Sloshing Pressure determination

FILLING LEVEL FILE NAME

15.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_15.LFL
 30.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_30.LFL
 45.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_45.LFL
 60.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_60.LFL
 75.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_75.LFL
 90.00 Slosh_Sredisnji_PITCH+90_90.LFL
 15.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_15.LFL
 30.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_30.LFL
 45.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_45.LFL
 60.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_60.LFL
 75.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_75.LFL
 90.00 Slosh_Sredisnji_PITCH-90_90.LFL
 FILES APPENDED TO SredisnjiMULTIJOB.LFL

TANK DATA

Tank Name = Pramcani
 Tank Length = 25.900 m
 Tank Breadth = 15.900 m
 Tank Depth = 15.900 m
 VCG of ship from Baseline = 8.950 m
 Height of Inner Bottom = 2.000 m

LCG of ship from Midship = 0.000 m
 Centre of Tank from Midship = 61.800 m
 Centre of Tank from Centreline = 6.600 m
 Density of Liquid = 920.000 kg/m³
 No Internal Stiffening

Filling Number	Filling Level %
1	15.0
2	30.0
3	45.0
4	60.0
5	75.0
6	90.0
7	99.0

CALCULATED RESULTS: ROLL ASSESSMENT

Ships Natural Rolling Period:

Ballast = 8.986 sec

Loaded = 14.264 sec

Maximum 'Lifetime' Roll Angle = 20.727 deg

Maximum 'Lifetime' Heave Amplitude = 4.000 m

Maximum 'Lifetime' Sway Amplitude = 2.500 m

Maximum 'Lifetime' Vertical Acceleration = 7.486 m/s²

Lower Bound of Critical fill range = 1.75 %

Upper Bound of Critical fill range = 100.00 %

Filling Level %	Natural Period (s)	Min Separation	Assessment Level
15.0	6.81	2.18	2
30.0	5.26	3.73	2
45.0	4.79	4.20	2
60.0	4.62	4.37	2
75.0	4.55	4.43	2
90.0	4.53	4.46	2
99.0	4.52	4.46	0

Level 2 Sloshing Pressure determination

Tank (%) Depth m Pressure (kN/m²) at Filling Levels:

		15.0
95.0	15.1	0.0
90.0	14.3	0.0
85.0	13.5	0.0
80.0	12.7	0.0
75.0	11.9	0.0
70.0	11.1	0.0
65.0	10.3	0.0
60.0	9.5	0.0
55.0	8.7	0.0
50.0	7.9	126.1
45.0	7.2	138.8
40.0	6.4	151.4
35.0	5.6	164.1
30.0	4.8	176.7
25.0	4.0	189.4
20.0	3.2	202.0
15.0	2.4	214.7
10.0	1.6	227.3
5.0	0.8	240.0

* INFORMATION * LEVEL 2 CALCULATIONS ABANDONED DUE TO IMPACT ON TANK CEILING

LR.FLUIDS DATA WILL BE GENERATED FOR LEVEL 3 CALCULATIONS FOR THE REMAINING FILLING LEVELS

Level 3 Sloshing Pressure determination

FILLING LEVEL FILE NAME

15.00 Slosh_Pramcani_ROLL_15.LFL
30.00 Slosh_Pramcani_ROLL_30.LFL
45.00 Slosh_Pramcani_ROLL_45.LFL
60.00 Slosh_Pramcani_ROLL_60.LFL
75.00 Slosh_Pramcani_ROLL_75.LFL
90.00 Slosh_Pramcani_ROLL_90.LFL
FILES APPENDED TO PramcaniMULTIJOB.LFL

CALCULATED RESULTS: PITCH ASSESSMENT

Ships Natural Pitching Period:
Ballast =8.519 sec
Loaded =11.560 sec
Maximum 'Lifetime' Pitch Angle =10.388 deg
Maximum 'Lifetime' Heave Amplitude =4.000 m
Maximum 'Lifetime' Vertical Acceleration =7.486 m/s²
Lower Bound of Critical fill range = 0.00 %
Upper Bound of Critical fill range = 100.00 %

Filling Level %	Natural Period (s)	Min Separation	Assessment Level
15.0	10.86	0.70	2
30.0	7.98	0.54	2
45.0	6.88	1.64	2
60.0	6.36	2.16	2
75.0	6.09	2.43	2
90.0	5.94	2.58	2
99.0	5.89	2.63	0

Level 2 Sloshing Pressure determination

Tank (%)	Depth m	Pressure (kN/m ²) at Filling Levels:	
		15.0	30.0
95.0	15.1	0.0	0.0
90.0	14.3	0.0	123.3
85.0	13.5	0.0	125.7
80.0	12.7	0.0	129.2
75.0	11.9	0.0	133.5
70.0	11.1	0.0	138.6
65.0	10.3	0.0	144.5
60.0	9.5	0.0	151.1
55.0	8.7	0.0	190.4
50.0	7.9	0.0	203.0
45.0	7.2	0.0	215.7
40.0	6.4	153.2	228.3
35.0	5.6	165.9	241.0
30.0	4.8	178.5	253.6
25.0	4.0	191.2	266.3
20.0	3.2	203.8	278.9
15.0	2.4	216.5	291.6
10.0	1.6	229.1	304.2
5.0	0.8	241.8	316.9

* INFORMATION * LEVEL 2 CALCULATIONS ABANDONED DUE TO IMPACT ON TANK CEILING
LR.FLUIDS DATA WILL BE GENERATED FOR LEVEL 3 CALCULATIONS FOR THE REMAINING FILLING LEVELS

Level 3 Sloshing Pressure determination

FILLING LEVEL	FILE NAME
15.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_15.LFL
30.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_30.LFL
45.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_45.LFL
60.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_60.LFL
75.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_75.LFL
90.00	Slosh_Pramcani_PITCH+90_90.LFL
15.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_15.LFL
30.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_30.LFL
45.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_45.LFL
60.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_60.LFL
75.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_75.LFL
90.00	Slosh_Pramcani_PITCH-90_90.LFL
FILES APPENDED TO PramcaniMULTIJOB.LFL	

Prilog C

Ulazne liste programa „SDA Fluids“

SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 30%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 30.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -9.30 -1.00
PMESH 0.62 0.636 -9.30 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 26 1 2001 BDRY
MESH 27 1 30 4 2001 BDRY
MESH 30 5 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 16.8 0.0 18.6 2.5 18.6 15.9
IMAGE 18.6 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 45%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 45.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -9.30 -1.00
PMESH 0.62 0.636 -9.30 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 26 1 2001 BDRY
MESH 27 1 30 4 2001 BDRY
MESH 30 5 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 16.8 0.0 18.6 2.5 18.6 15.9
IMAGE 18.6 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 60%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 60.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -9.30 -1.00
PMESH 0.62 0.636 -9.30 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 26 1 2001 BDRY
MESH 27 1 30 4 2001 BDRY
MESH 30 5 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 16.8 0.0 18.6 2.5 18.6 15.9
IMAGE 18.6 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 75%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 75.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -9.30 -1.00
PMESH 0.62 0.636 -9.30 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 26 1 2001 BDRY
MESH 27 1 30 4 2001 BDRY
MESH 30 5 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 16.8 0.0 18.6 2.5 18.6 15.9
IMAGE 18.6 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 90%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 90.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -9.30 -1.00
PMESH 0.62 0.636 -9.30 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 26 1 2001 BDRY
MESH 27 1 30 4 2001 BDRY
MESH 30 5 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 16.8 0.0 18.6 2.5 18.6 15.9
IMAGE 18.6 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 45%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 45.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 94.10 104.10
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -8.60 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -8.60 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```


SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 60%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 60.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -8.60 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -8.60 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 75%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 75.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -8.60 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -8.60 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 90%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 90.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -8.60 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -8.60 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 30%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 30.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -6.60 -1.00
PMESH 0.53 0.636 -6.60 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 24 1 2001 BDRY
MESH 25 1 30 6 2001 BDRY
MESH 30 7 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 13.2 0.0 15.9 3.7 15.9 15.9
IMAGE 15.9 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 45%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 45.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -6.60 -1.00
PMESH 0.53 0.636 -6.60 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 24 1 2001 BDRY
MESH 25 1 30 6 2001 BDRY
MESH 30 7 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 13.2 0.0 15.9 3.7 15.9 15.9
IMAGE 15.9 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 60%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 60.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -6.60 -1.00
PMESH 0.53 0.636 -6.60 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 24 1 2001 BDRY
MESH 25 1 30 6 2001 BDRY
MESH 30 7 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 13.2 0.0 15.9 3.7 15.9 15.9
IMAGE 15.9 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 75%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 75.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH -6.60 -1.00
PMESH 0.53 0.636 -6.60 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 24 1 2001 BDRY
MESH 25 1 30 6 2001 BDRY
MESH 30 7 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 13.2 0.0 15.9 3.7 15.9 15.9
IMAGE 15.9 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 90%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 90.00 920
$ ROLL MOTION
MOTION SPEC 14.51 9.99 -0.001 0.00 6.00 8.99 2.00
MOTION VERT 4.00 9.99 -0.001 90.0 -9.81
MOTION HORI 2.50 9.99 -0.001 180.0
$
OUTPUT 149.72 159.72
TIMING 0.0399 159.72
$
$PMESH 0.53 0.636 -6.60 -1.00
$FULL TANK TOP BOTTOM
MESH 1 1 24 1 2001 BDRY
MESH 25 1 30 6 2001 BDRY
MESH 30 7 30 25 2001 BDRY
MESH 29 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 13.2 0.0 15.9 3.7 15.9 15.9
IMAGE 15.9 15.9 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 45%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 45.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 94.10 104.10
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -61.80 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -61.80 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 60%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 60.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52
3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -61.80 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -61.80 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 75%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 75.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -61.80 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -61.80 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 90%

```

$ DATA CARD CREATED BY PROGRAM 10603
BUILDER Brodosplit_
YARD _
INITIALS_
TITLE StenaSloshing_
$ FLUID AND SHIP DATA
PFLUID 90.00 920
$ PITCH MOTION
MOTION SPEC 7.27 9.52 -0.001 0.00 3.00 8.52 3.00
MOTION VERT 4.00 9.52 -0.001 90.0 -9.81
$
OUTPUT 140.38 150.38
TIMING 0.0376 150.38
$
$PMESH -61.80 -1.00
PMESH 0.74 0.6360 -61.80 -1.00
MESH 1 1 35 1 2001 BDRY
MESH 35 2 35 25 2001 BDRY
MESH 34 25 1 25 2001 BDRY
MESH 1 24 1 2 2001 BDRY
$
IMAGE 0.0 0.0 25.9 0.0 25.9 15.9 0.0 15.9
IMAGE 0.0 15.9 0.0 0.0
$ DATA END

```

Prilog D

Primjer izlazne liste programa „SDA Fluids“

PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 90%

24-10-2007
StenaSloshing
SIMULATION LOG

LR.FLUIDS 3.4A

PAGE 1
Brodosplit

[illegible]

24-10-2007
StenaSloshing
SIMULATION LOG

LR.FLUIDS 3.4A

PAGE 2
Brodosplit

SIMULATION CYCLE	TIME	CURRENT TIME-STEP	NO. OF ITER TN	REAL TIME	MAX DIV	MAX PRESS	MAX U-VEL	MAX V-VEL
2238	3.96E+1	9.41E-3	15	3	-9.69E-3	1.30E+5	-2.31E+0	3.24E+0
2238	3.96E+1	9.41E-3	15	3	-9.69E-3	1.30E+5	-2.31E+0	3.24E+0
2238	3.96E+1	9.41E-3	15	3	-9.69E-3	1.30E+5	-2.31E+0	3.24E+0
2238	3.96E+1	9.41E-3	15	3	-9.69E-3	1.30E+5	-2.31E+0	3.24E+0
2238	3.96E+1	9.41E-3	15	3	-9.69E-3	1.30E+5	-2.31E+0	3.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
2648	4.72E+1	1.88E-2	15	4	-9.22E-3	1.01E+5	-1.92E+0	1.24E+0
3057	5.48E+1	1.88E-2	9	5	-9.76E-3	8.15E+4	-1.33E+0	1.39E+0
3057	5.48E+1	1.88E-2	9	5	-9.76E-3	8.15E+4	-1.33E+0	1.39E+0
3264	5.86E+1	1.41E-2	45	5	-9.90E-3	2.15E+5	-1.73E+0	4.44E+0
3264	5.86E+1	1.41E-2	45	5	-9.90E-3	2.15E+5	-1.73E+0	4.44E+0
3264	5.86E+1	1.41E-2	45	5	-9.90E-3	2.15E+5	-1.73E+0	4.44E+0
3470	6.24E+1	1.88E-2	13	5	-9.63E-3	7.18E+4	-1.36E+0	1.40E+0
3470	6.24E+1	1.88E-2	13	5	-9.63E-3	7.18E+4	-1.36E+0	1.40E+0
3684	6.62E+1	1.88E-2	7	6	9.06E-3	2.20E+5	-2.12E+0	3.48E+0
3684	6.62E+1	1.88E-2	7	6	9.06E-3	2.20E+5	-2.12E+0	3.48E+0
3684	6.62E+1	1.88E-2	7	6	9.06E-3	2.20E+5	-2.12E+0	3.48E+0
3684	6.62E+1	1.88E-2	7	6	9.06E-3	2.20E+5	-2.12E+0	3.48E+0
3684	6.62E+1	1.88E-2	7	6	9.06E-3	2.20E+5	-2.12E+0	3.48E+0
3898	7.00E+1	1.88E-2	6	6	-8.97E-3	6.77E+4	1.66E+0	1.78E+0
3898	7.00E+1	1.88E-2	6	6	-8.97E-3	6.77E+4	1.66E+0	1.78E+0
3898	7.00E+1	1.88E-2	6	6	-8.97E-3	6.77E+4	1.66E+0	1.78E+0
3898	7.00E+1	1.88E-2	6	6	-8.97E-3	6.77E+4	1.66E+0	1.78E+0
3898	7.00E+1	1.88E-2	6	6	-8.97E-3	6.77E+4	1.66E+0	1.78E+0
4114	7.38E+1	1.88E-2	22	7	8.92E-3	2.19E+5	-2.55E+0	3.25E+0
4114	7.38E+1	1.88E-2	22	7	8.92E-3	2.19E+5	-2.55E+0	3.25E+0
4114	7.38E+1	1.88E-2	22	7	8.92E-3	2.19E+5	-2.55E+0	3.25E+0
4114	7.38E+1	1.88E-2	22	7	8.92E-3	2.19E+5	-2.55E+0	3.25E+0
4114	7.38E+1	1.88E-2	22	7	8.92E-3	2.19E+5	-2.55E+0	3.25E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4332	7.76E+1	1.88E-2	14	7	-9.97E-3	6.78E+4	1.42E+0	-2.30E+0
4553	8.14E+1	1.88E-2	18	7	9.66E-3	2.16E+5	-2.41E+0	3.32E+0
4553	8.14E+1	1.88E-2	18	7	9.66E-3	2.16E+5	-2.41E+0	3.32E+0
4553	8.14E+1	1.88E-2	18	7	9.66E-3	2.16E+5	-2.41E+0	3.32E+0
4553	8.14E+1	1.88E-2	18	7	9.66E-3	2.16E+5	-2.41E+0	3.32E+0
4553	8.14E+1	1.88E-2	18	7	9.66E-3	2.16E+5	-2.41E+0	3.32E+0
4763	8.52E+1	1.88E-2	9	8	-9.92E-3	7.44E+4	1.26E+0	-1.97E+0
4763	8.52E+1	1.88E-2	9	8	-9.92E-3	7.44E+4	1.26E+0	-1.97E+0
4763	8.52E+1	1.88E-2	9	8	-9.92E-3	7.44E+4	1.26E+0	-1.97E+0

24-10-2007
StenaSloshing
SIMULATION LOG

LR.FLUIDS 3.4A

PAGE 3
Brodosplit

SIMULATION CYCLE	TIME	CURRENT TIME-STEP	NO. OF ITER TN	REAL TIME	MAX DIV	MAX PRESS	MAX U-VEL	MAX V-VEL
4989	8.90E+1	1.88E-2	18	8	9.92E-3	2.00E+5	-2.14E+0	2.63E+0
4989	8.90E+1	1.88E-2	18	8	9.92E-3	2.00E+5	-2.14E+0	2.63E+0
4989	8.90E+1	1.88E-2	18	8	9.92E-3	2.00E+5	-2.14E+0	2.63E+0
4989	8.90E+1	1.88E-2	18	8	9.92E-3	2.00E+5	-2.14E+0	2.63E+0
4989	8.90E+1	1.88E-2	18	8	9.92E-3	2.00E+5	-2.14E+0	2.63E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5201	9.28E+1	1.88E-2	15	9	-9.84E-3	9.43E+4	-1.46E+0	1.62E+0
5419	9.66E+1	1.88E-2	16	9	8.62E-3	1.68E+5	-1.69E+0	-1.35E+0
5419	9.66E+1	1.88E-2	16	9	8.62E-3	1.68E+5	-1.69E+0	-1.35E+0
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5637	1.00E+2	1.88E-2	19	10	-8.88E-3	1.30E+5	1.21E+0	-9.68E-1
5855	1.04E+2	1.88E-2	40	10	9.14E-3	1.10E+5	-1.95E+0	-2.02E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6073	1.08E+2	1.88E-2	26	10	-9.26E-3	1.78E+5	1.88E+0	-2.66E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6287	1.12E+2	1.88E-2	9	11	9.26E-3	6.40E+4	-1.06E+0	2.25E+0
6512	1.16E+2	1.41E-2	135	11	9.18E-3	2.16E+5	-2.21E+0	4.32E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6517	1.16E+2	2.34E-3	18	11	9.92E-3	2.07E+5	-2.39E+0	4.93E+0
6728	1.19E+2	1.88E-2	15	12	-9.32E-3	9.61E+4	-1.07E+0	1.18E+0
6728	1.19E+2	1.88E-2	15	12	-9.32E-3	9.61E+4	-1.07E+0	1.18E+0
6728	1.19E+2	1.88E-2	15	12	-9.32E-3	9.61E+4	-1.07E+0	1.18E+0
6728	1.19E+2	1.88E-2	15	12	-9.32E-3	9.61E+4	-1.07E+0	1.18E+0
6728	1.19E+2	1.88E-2	15	12	-9.32E-3	9.61E+4	-1.07E+0	1.18E+0

24-10-2007
StenaSloshing
SIMULATION LOG

LR.FLUIDS 3.4A

PAGE 4
Brodosplit

[illegible]

24-10-2007
StenaSloshing
SIMULATION LOG

LR.FLUIDS 3.4A

PAGE 5
Brodosplit

```

-----
-----
      SIMULATION   CURRENT   NO. OF   REAL   MAX   MAX   MAX   MAX
CYCLE  TIME        TIME-STEP ITERTN  TIME  DIV  PRESS  U-VEL  V-VEL

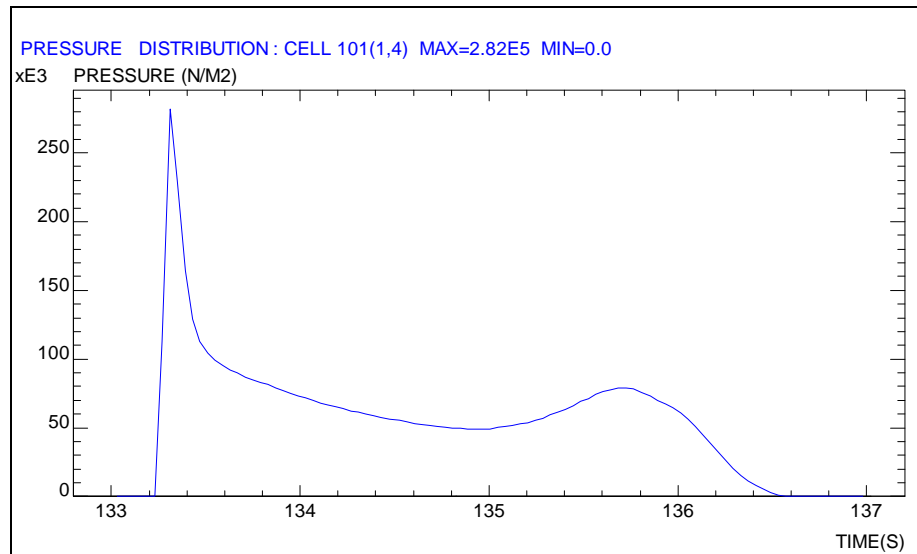
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8000   1.42E+2   1.88E-2     9     15   9.63E-3  5.54E+4 -1.54E+0  1.76E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8206   1.46E+2   1.88E-2    21     15   9.16E-3  2.10E+5  1.72E+0  2.57E+0
8441   1.50E+2   1.88E-2    49     16  -9.16E-3  1.42E+5 -1.72E+0  1.45E+0

```

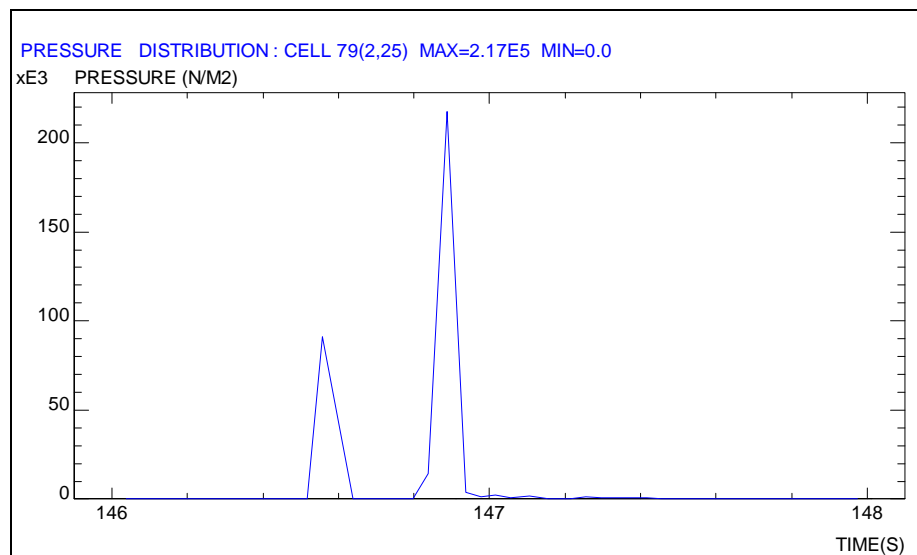
Prilog E

Detaljan prikaz maksimalnog tlaka za različite razine punjenja

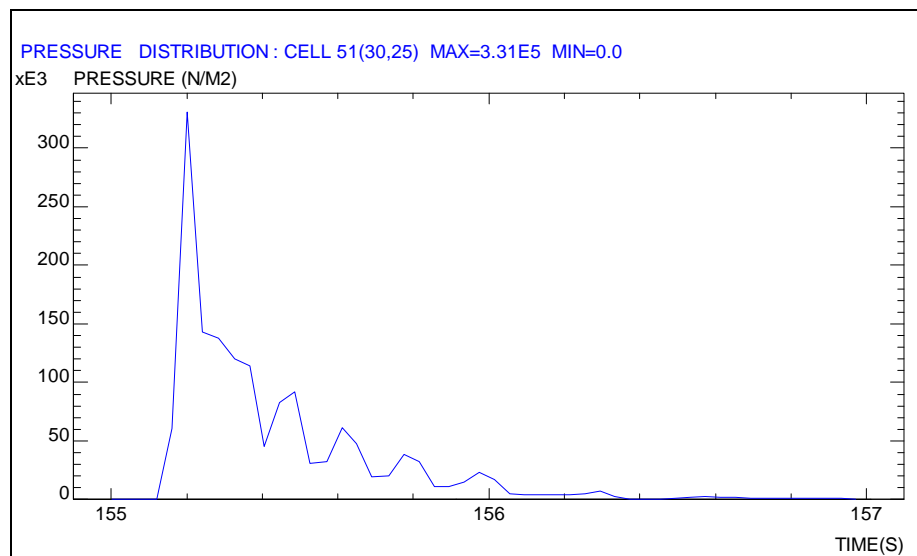
SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 30%



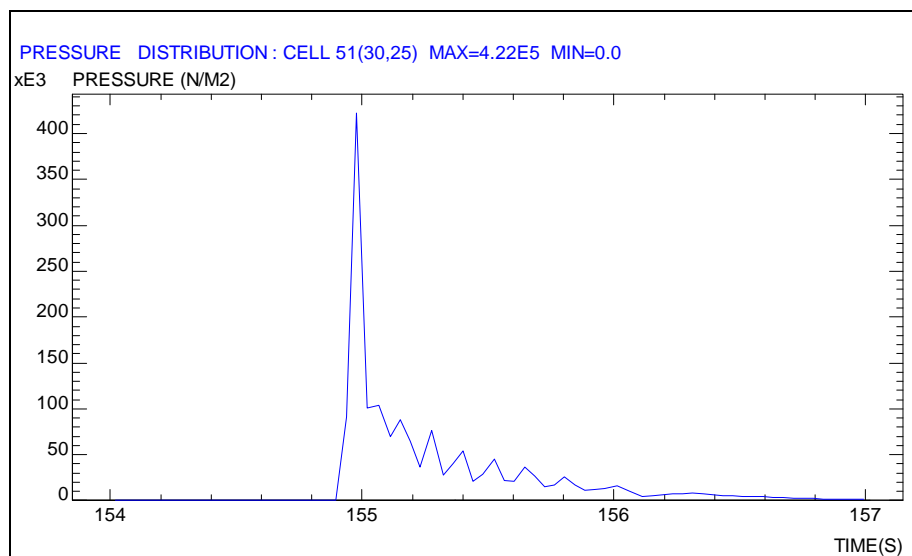
SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 45%



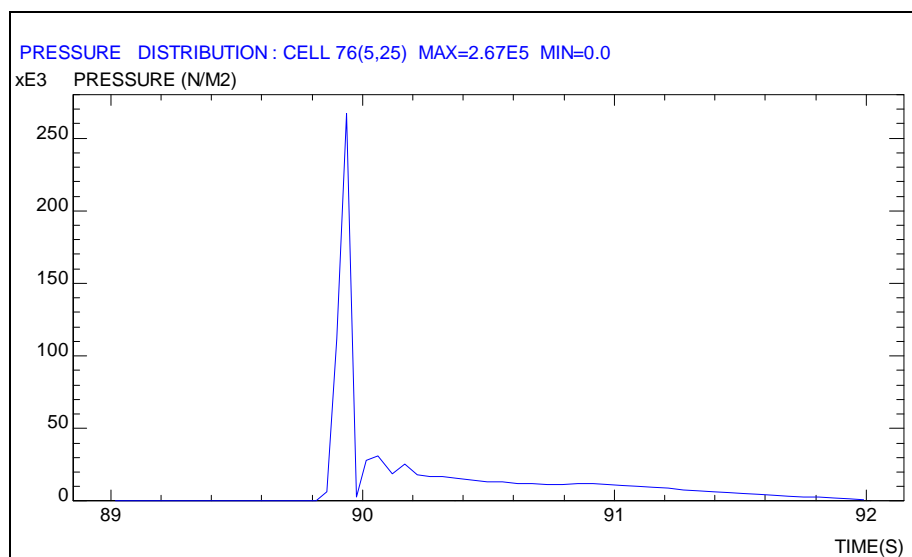
SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 60%



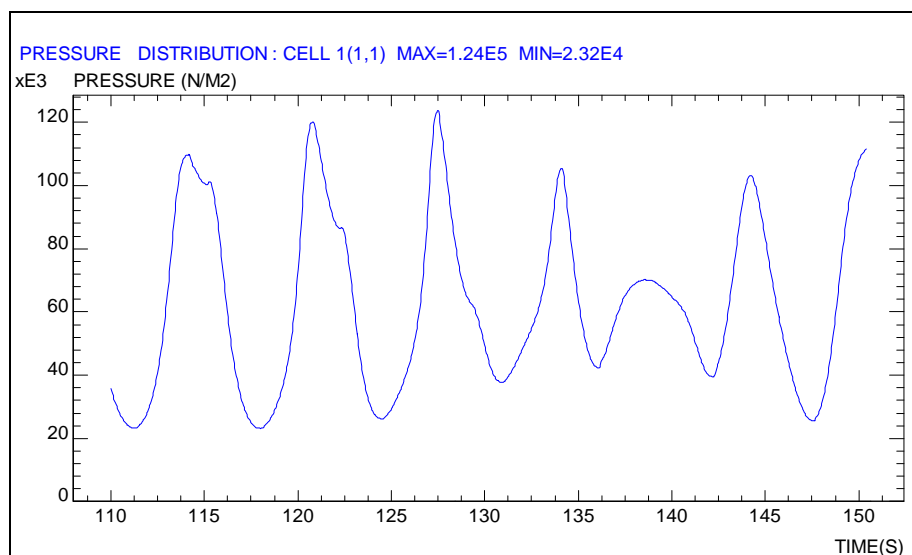
SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 75%



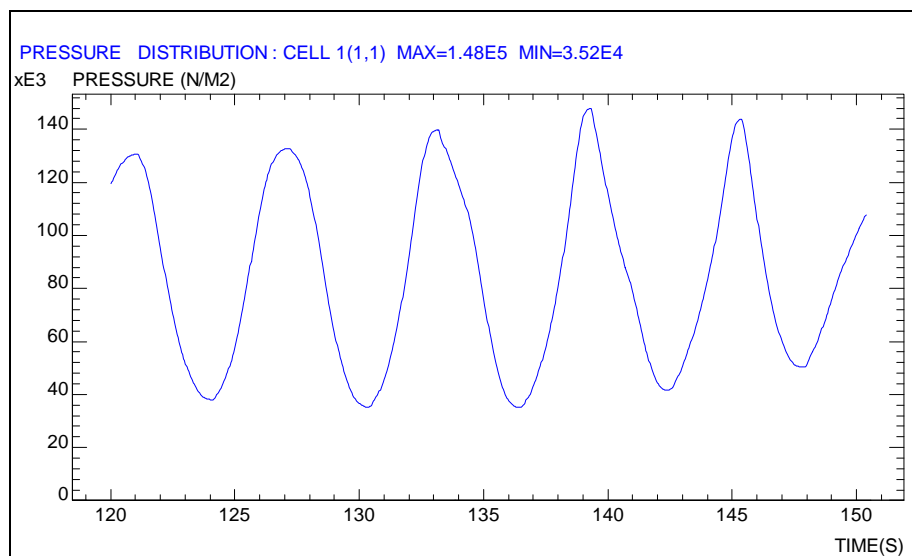
SREDIŠNJI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 90%



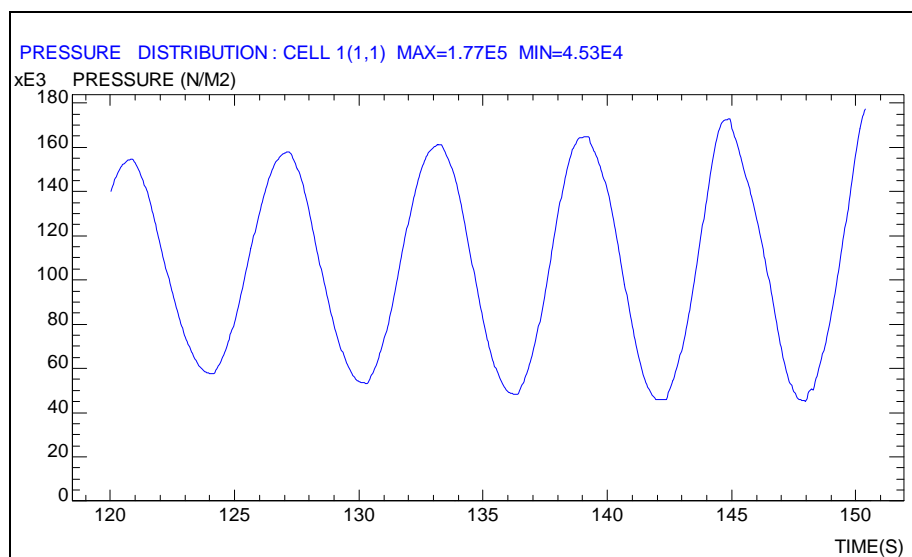
SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 45%



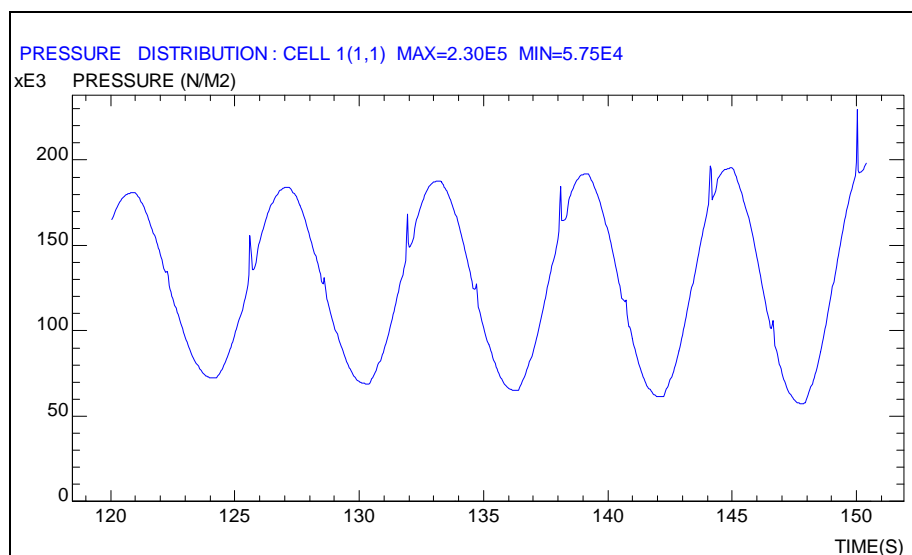
SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 60%



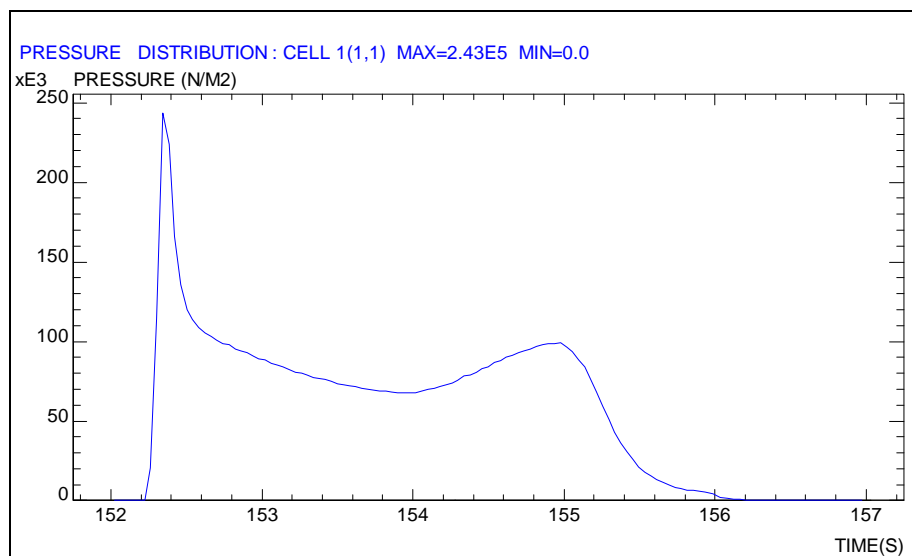
SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 75%



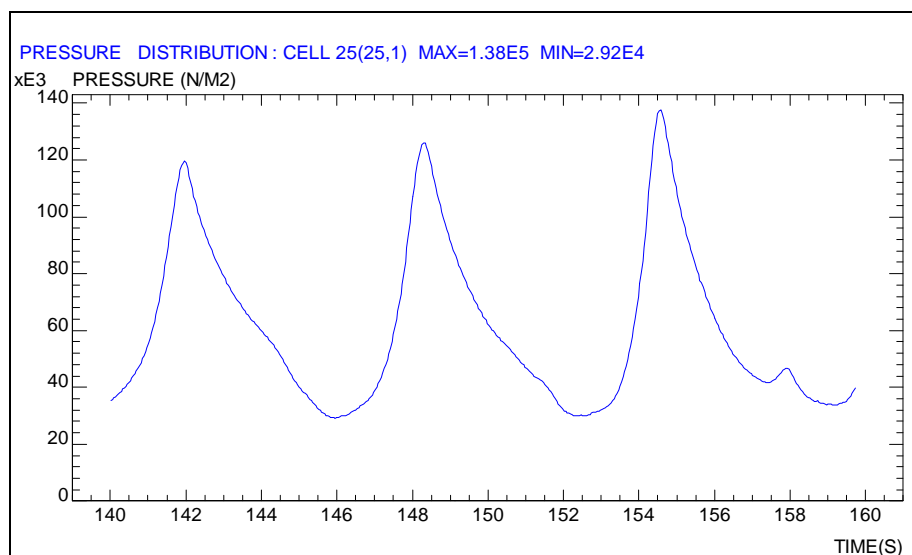
SREDIŠNJI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 90%



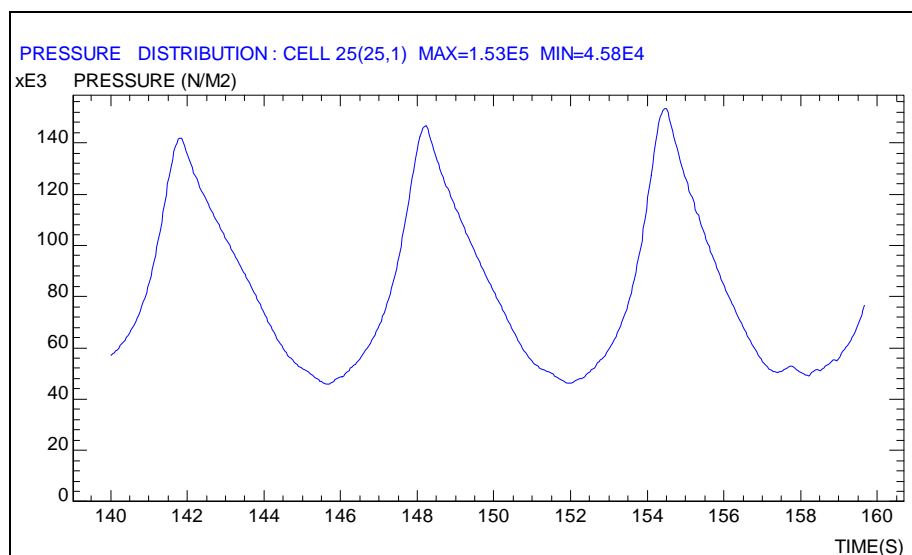
PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 30%

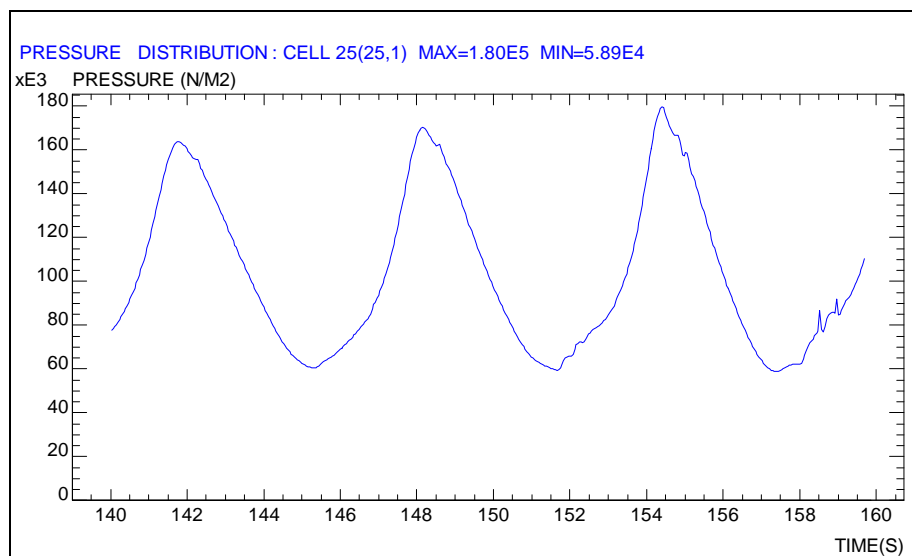
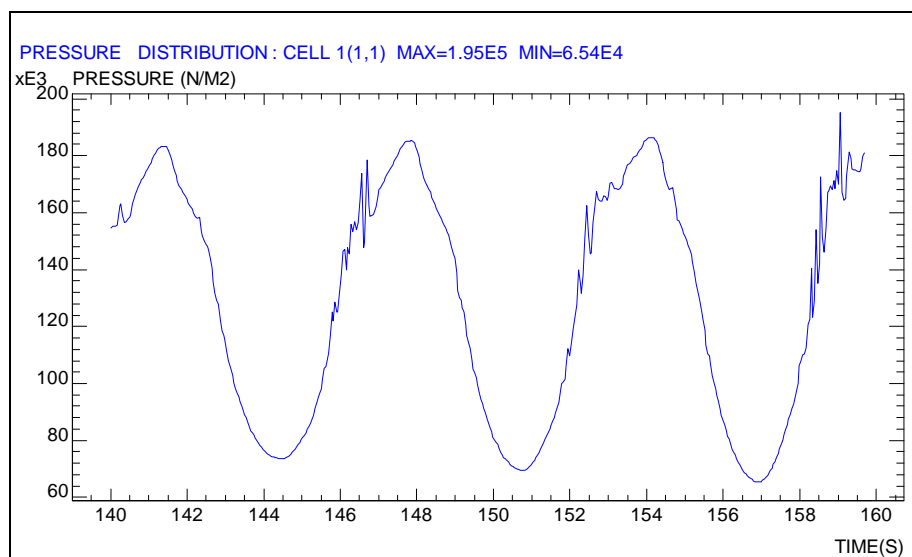
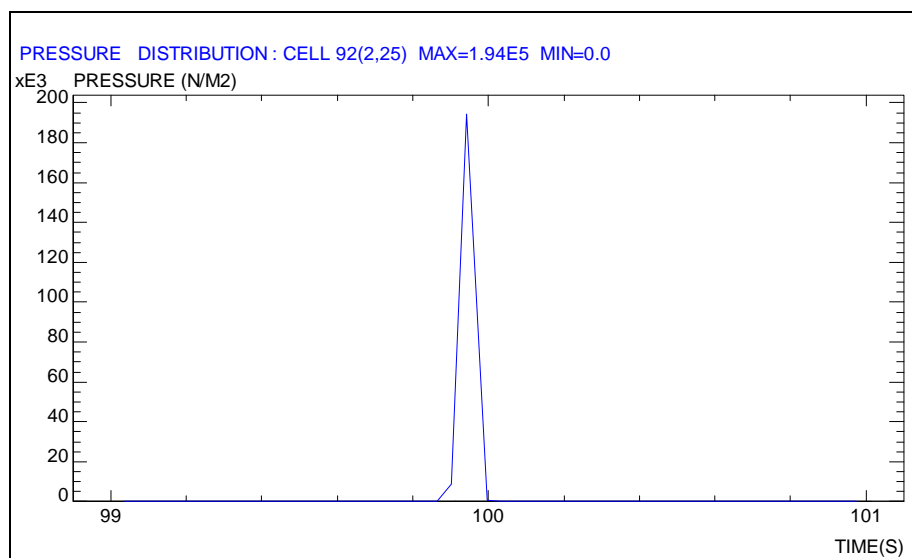


PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 45%

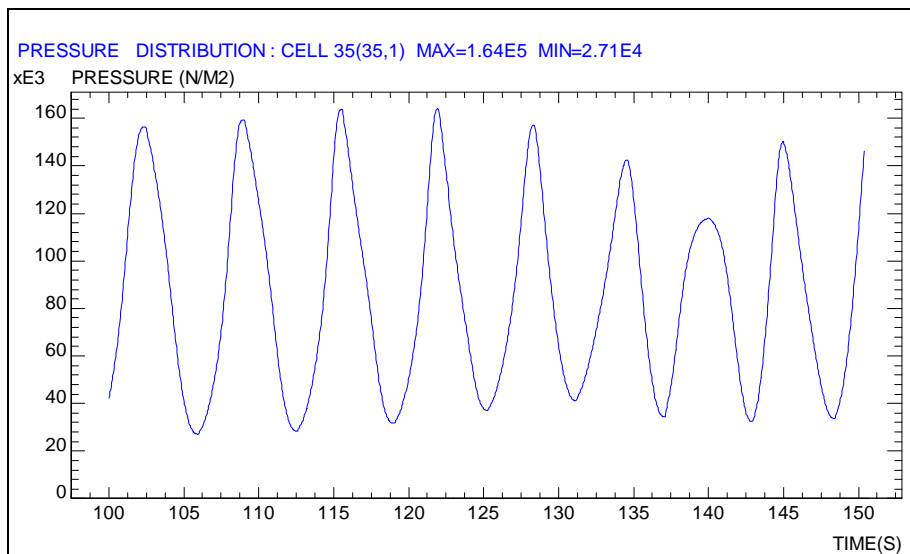


PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 60%

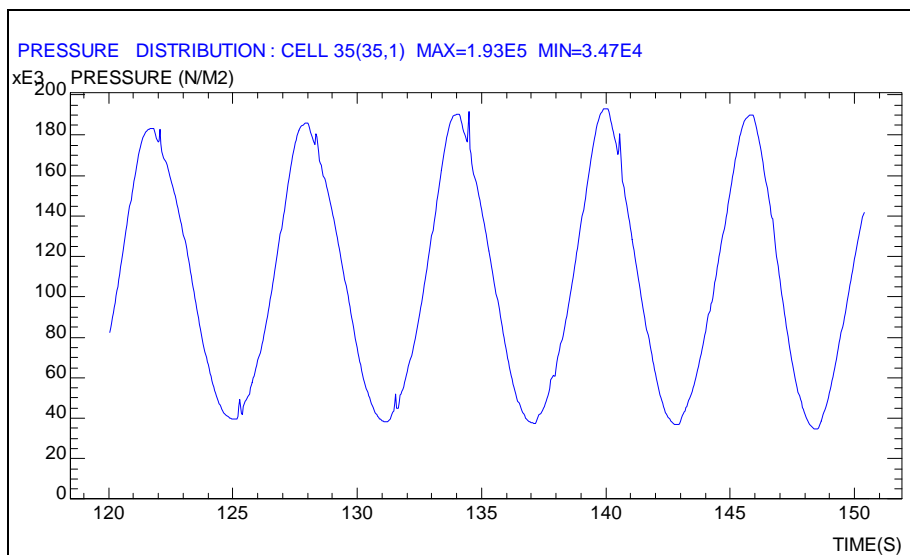


PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 75%**PRAMČANI TANK – LJULJANJE – RAZINA PUNJENJA 90%****PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 45%**

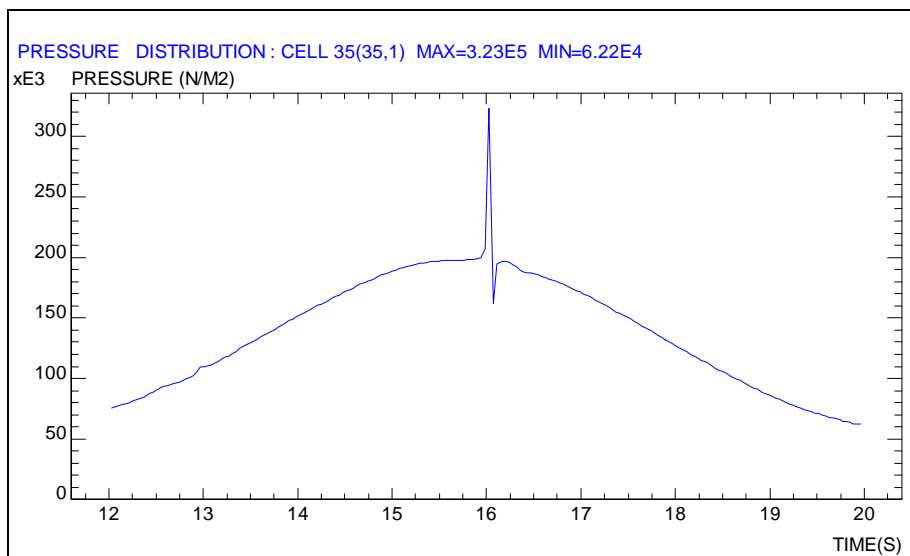
PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 60%



PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 75%



PRAMČANI TANK – POSRTANJE – RAZINA PUNJENJA 90%



Prilog F

Ulazne i izlazne liste programa „SDA Ultimate Strength“

- Lloyd's Register -
Ultimate Strength of Stiffened Panels for Sloshing and Slamming

12-11-2007

Title = Paluba 1
Young's Modulus = 206000.00N/mm2
Poisson's Ratio = 0.30
Loading (O,S or I) = O
Bulkhead Orientation (L or T) = L
Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
Stiffener Spacing s = 800.00mm
Frame Spacing l = 3300.00mm
Bracket Connection (Y or N) = N
Effective Stiffener Span = 3300.00mm
Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
Web Yield Stress = 235.00N/mm2
Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 14.00mm
Web Depth dw = 240.00mm
Web Thickness tw = 10.00mm
Flange Breadth bf = 0.00mm
Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
Transverse Stress = 0.00N/mm2
Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
Initial Panel Imperfection = 6.67mm
Panel Allowable Permanent Set = 2.00mm
Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 278.11kN/m2
Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
from unstiffened side of panel = 139.00kN/m2
Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
from stiffened side of panel = 100.74kN/m2

Associated safety factor = INFINITE
 Maximum allowable pressure range = 125.10kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

 Title = Paluba 2
 Young's Modulus = 206000.00N/mm²
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

 Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 800.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

 Plate Yield Stress = 235.00N/mm²
 Web Yield Stress = 235.00N/mm²
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm²
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m²
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m²

 Parametric Analysis required (Y or N) = N

 Plate Thickness tp = 14.50mm
 Web Depth dw = 240.00mm
 Web Thickness tw = 10.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

 Axial Stress = 0.00N/mm²
 Transverse Stress = 0.00N/mm²
 Shear Stress = 0.00N/mm²

 Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.67mm
 Panel Allowable Permanent Set = 2.00mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 298.23kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 139.74kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 102.34kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 125.55kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Dolje 1
 Young's Modulus = 206000.00N/mm²
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 767.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm²
 Web Yield Stress = 235.00N/mm²
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm²
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m²
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m²

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 15.00mm
 Web Depth dw = 320.00mm
 Web Thickness tw = 12.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm²
 Transverse Stress = 0.00N/mm²
 Shear Stress = 0.00N/mm²

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.39mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.92mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 347.48kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 281.50kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 195.25kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 268.46kN/m²
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Bok 1
 Young's Modulus = 206000.00N/mm2
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 770.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
 Web Yield Stress = 235.00N/mm2
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 13.50mm
 Web Depth dw = 300.00mm
 Web Thickness tw = 11.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
 Transverse Stress = 0.00N/mm2
 Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.42mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.93mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 279.13kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 227.97kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 156.59kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 215.79kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Bok 2
 Young's Modulus = 206000.00N/mm2
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 770.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
 Web Yield Stress = 235.00N/mm2
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 12.50mm
 Web Depth dw = 280.00mm
 Web Thickness tw = 11.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
 Transverse Stress = 0.00N/mm2
 Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.42mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.93mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 239.85kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 200.44kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 140.55kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 187.81kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Bok 3
 Young's Modulus = 206000.00N/mm2
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 770.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
 Web Yield Stress = 235.00N/mm2
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 11.50mm
 Web Depth dw = 260.00mm
 Web Thickness tw = 11.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
 Transverse Stress = 0.00N/mm2
 Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.42mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.93mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 204.07kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 173.98kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 124.23kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 161.78kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Bok 4
 Young's Modulus = 206000.00N/mm2
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 770.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
 Web Yield Stress = 235.00N/mm2
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 11.00mm
 Web Depth dw = 240.00mm
 Web Thickness tw = 11.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
 Transverse Stress = 0.00N/mm2
 Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.42mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.93mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 187.49kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 150.29kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 110.37kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 138.38kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Title = Gore koso
 Young's Modulus = 206000.00N/mm2
 Poisson's Ratio = 0.30
 Loading (O,S or I) = O
 Bulkhead Orientation (L or T) = L
 Stiffening (L,T or V) = L

Panel Location = 0.00
 Frame or Girder Thickness tff = 0.00mm
 Tank Top Thickness tpp = 0.00mm
 Stiffener Spacing s = 728.00mm
 Frame Spacing l = 3300.00mm
 Bracket Connection (Y or N) = N
 Effective Stiffener Span = 3300.00mm
 Stiffener Type (F,T,A or B) = F

Plate Yield Stress = 235.00N/mm2
 Web Yield Stress = 235.00N/mm2
 Flange Yield Stress = 235.00N/mm2
 Pressure Applied to Unstiffened Side = 0.00kN/m2
 Pressure Applied to Stiffened Side = 0.00kN/m2

Parametric Analysis required (Y or N) = N

Plate Thickness tp = 14.00mm
 Web Depth dw = 240.00mm
 Web Thickness tw = 10.00mm
 Flange Breadth bf = 0.00mm
 Flange Thickness tf = 0.00mm

Axial Stress = 0.00N/mm2
 Transverse Stress = 0.00N/mm2
 Shear Stress = 0.00N/mm2

Use Default Panel Properties (Y or N) = Y
 Initial Panel Imperfection = 6.07mm
 Panel Allowable Permanent Set = 1.82mm
 Panel Stiffness Ratio Kb/K = 10.00

RESULTS

PANEL ANALYSIS

Maximum allowable pressure on panel = 335.88kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

STIFFENER ANALYSIS

Maximum allowable pressure on stiffener
 from unstiffened side of panel = 151.31kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure on stiffener
 from stiffened side of panel = 109.29kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE

Maximum allowable pressure range = 136.83kN/m2
 Associated safety factor = INFINITE